

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA OFFSHORE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

GUILHERME MOURA PAREDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Co-Orientador: Professor Doutor Jose Gregorio Iglesias Rodriguez

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de várias pessoas cujo apoio foi fundamental e a quem desejo agradecer.

Gostaria de agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia, responsável pelo projecto FCT-PTCD/EME-MFE/66999/2006, no qual o presente trabalho se enquadra, e ao Professor Francisco Taveira Pinto, por ter proposto este tema e acompanhado a sua realização.

Agradeço também aos meus pais, por toda a ajuda e paciência que me disponibilizaram na realização deste trabalho.

Por fim gostaria de agradecer ao Sr. Engº. Paulo Santos, por toda colaboração que prestou na construção do modelo e familiarização com o equipamento laboratorial, apesar de não estar envolvido no trabalho em causa, bem como ao Sr. Engº. Miguel Lopes, por toda a sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas relacionadas com a teoria e experimentação de dispositivos de conversão de energia das ondas.

Com uma palavra de apreço, testemunho o contributo inestimável de todos os Professores que estiveram sempre presentes a esclarecer a dúvida e a garantir, graças à sua competência e total disponibilidade, a qualidade dos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

RESUMO

Este trabalho constitui a primeira abordagem ao tema da exploração da energia das ondas por parte da FEUP, inserido num projecto de investigação coordenado pelo IST. Numa primeira fase foi realizada uma pesquisa da tecnologia existente e do seu estado de desenvolvimento. Numa segunda fase foram realizados ensaios em modelo reduzido, em tanque de ondas, de um dispositivo deste tipo em desenvolvimento no IST. O trabalho experimental correspondeu à determinação das frequências de oscilação natural, coeficientes de amortecimento e curva do factor de amplificação dinâmica do corpo flutuando livremente, para movimentos de arfagem e cabeceio. Verificou-se que, para arfagem, os resultados experimentais estão de acordo com aqueles previstos por simulação numérica, realizada pela equipa do IST, a menos da intensidade da resposta sob acção de agitação. Para movimentos de cabeceio, os resultados experimentais apresentam desvios significativos face aos previstos. No futuro está prevista a realização ensaios com vista ao estudo do comportamento e influência de um sistema de amarrações no dispositivo.

PALAVRAS-CHAVE: Dispositivos de conversão de energia das ondas, Amarração, Amortecimento, Ressonância, Energia.

ABSTRACT

This work is the first approach to the topic of exploitation of wave energy by FEUP, and it is part of a research project coordinated by the IST. In a first stage, a research of the existing technology and its development status was undertaken. In a second stage, small scale model tests, in a wave tank, of a device of this kind being developed by the IST, were carried out. The experimental works consisted of the determination of the natural oscillating frequencies, damping coefficients and response amplitude operator curves for the free floating body in heave and in pitch motions. For the heave motions, the experimental results were in agreement with those obtained from numerical simulation performed by the IST, with exception to the response intensity under wave action. For pitch motions, the results revealed a significant deviation from those expected. In the near future, the execution of models tests in order to assess the behaviour and influence of a mooring system in the device is planned.

KEYWORDS: Wave energy converters (WEC), Mooring, Resonance, Damping, Energy.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO 1

2. A ENERGIA E O FLUXO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA 3

2.1. INTRODUÇÃO 3

2.2. AGITAÇÃO REGULAR 3

2.2.1. INTRODUÇÃO3

2.2.2. ELEMENTOS CARACTERIZADORES DE UMA ONDA.....4

2.2.3. CELERIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA5

2.2.4. CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS8

2.2.5. POTENCIAL DE VELOCIDADES.....9

2.2.6. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS 14

2.2.7. GRUPOS DE ONDAS.....15

2.2.8. ENERGIA E POTÊNCIA DE UMA ONDA..... 17

2.3. AGITAÇÃO IRREGULAR.....20

2.3.1. INTRODUÇÃO20

2.3.2. PARÂMETROS DE UM ESTADO DE AGITAÇÃO IRREGULAR.....20

2.3.3. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO22

2.3.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....24

2.3.5. ANÁLISE DE PERÍODOS30

2.3.6. ESPECTROS EMPÍRICOS32

2.3.6.1. Introdução.....32

2.3.6.2. Espectro de Pierson-Moskowitz32

2.3.6.3. Espectro de JONSWAP.....33

3. OS DISPOSITIVOS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS E ANÁLISE COMPARATIVA DO SEU FUNCIONAMENTO.....35

3.1. INTRODUÇÃO	35
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS	35
3.2.1. DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA	35
3.2.2. DIMENSÃO E/OU ORIENTAÇÃO	36
3.2.3. MODO DE FUNCIONAMENTO	37
3.3. MODO DE FUNCIONAMENTO	38
3.3.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE	38
3.3.2. PLACA ARTICULADA NO FUNDO.....	40
3.3.3. POINT ABSORVERS	41
3.3.3.1. Introdução.....	41
3.3.3.2. Oscilação de massas	42
3.3.3.3. Sistemas de bombagem de água.....	43
3.3.3.4. Sistemas de roldanas	45
3.3.3.5. Deslocamentos relativos	45
3.3.4. DISPOSITIVO ALONGADOS	48
3.3.5. GALGAMENTO	51
3.3.6. MAGNETO-HIDRODINÂMICO	53
3.3.7. OUTROS	53
3.3.8. MULTI POINT ABSORVERS	55
3.4. RESUMO.....	56
 4. SISTEMAS DE AMARRAÇÃO	 59
4.1. INTRODUÇÃO	59
4.2. NECESSIDADE, IMPORTÂNCIA E REQUISITOS DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES.....	59
4.3. TIPOS DE AMARRAÇÕES	60
4.4. MODO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES.....	62
4.5. ESTUDO DA CATENÁRIA	64
4.6. AMORTECIMENTO	66
4.7. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES.....	67
4.7.1. INTRODUÇÃO	67
4.7.2. MÉTODO ESTÁTICO.....	67
4.7.3. MÉTODO QUASE-ESTÁTICO	67

4.7.4. MÉTODO DINÂMICO	68
------------------------------	----

5. CARACTERÍSTICAS DE UM CORPO FLUTUANTE, PRODUÇÃO DE ENERGIA E LARGURA DE CAPTURA.....69

5.1. INTRODUÇÃO	69
5.2. NOTAÇÃO COMPLEXA	69
5.3. CENTRO DE IMPULSÃO, METACENTRO E CENTRO DE FLUTUAÇÃO.....	71
5.4. MOVIMENTO DE UM CORPO FLUTUANTE SOB A ACÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA	75
5.4.1. REFERENCIAL	75
5.4.2. FORÇAS QUE ACTUAM SOBRE UM CORPO FLUTUANTE.....	76
5.4.2.1. Caso geral	76
5.4.2.2. Forças hidrostáticas	78
5.4.2.3. Forças de radiação.....	80
5.4.2.4. Forças de excitação	82
5.4.3. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO	84
5.4.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	88
5.4.5. MOVIMENTOS SOB A ACÇÃO DE AGITAÇÃO IRREGULAR	88
5.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA E LARGURA DE CAPTURA	88

6. TRABALHO EXPERIMENTAL.....93

6.1. INTRODUÇÃO	93
6.2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	93
6.2.1. O TANQUE DE ONDAS	93
6.2.2. O SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS	94
6.2.3. A SONDA DE NÍVEL	94
6.2.4. O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE MOVIMENTOS	94
6.3. O MODELO	96
6.3.1. A BÓIA.....	96
6.3.2. O SISTEMA DE REFLECTORES	98
6.3.3. O CONJUNTO	100
6.3.4. CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS	101
6.4. ENSAIOS	102
6.4.1. INTRODUÇÃO	102

6.4.2. ENSAIOS DE EXTINÇÃO	102
6.4.3. ENSAIOS COM ONDAS (DETERMINAÇÃO DA CURVA DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA).....	102
6.5. TRATAMENTO DE DADOS	103
6.5.1. FREQUÊNCIAS DE OSCILAÇÃO NATURAL.....	103
6.5.2. AMORTECIMENTO	105
6.5.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA	110
6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	113
6.6.1. INTRODUÇÃO	113
6.6.2. FREQUÊNCIAS DE OSCILAÇÃO NATURAL.....	113
6.6.2.1. Arfagem	113
6.6.2.2. Cabeceio.....	113
6.6.3. AMORTECIMENTO.....	114
6.6.3.1. Arfagem	114
6.6.3.2. Cabeceio.....	114
6.6.4. ANÁLISE DAS CURVAS DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA.....	115
6.6.4.1. Introdução.....	115
6.6.4.2. Arfagem	115
6.6.4.3. Cabeceio.....	116
6.6.4.4. Efeito Doppler	116
6.6.4.5. Efeito de precessão.....	118
6.6.4.6. Deficiente funcionamento dos batedores	118
6.6.5. DIFICULDADES	118
6.6.5.1. Efeitos da luz solar	118
6.6.5.2. Posicionamento das câmaras	119
6.6.5.3. Sistema de reflectores.....	119
6.6.5.4. Tempo.....	119

7. CONCLUSÕES	121
----------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA	123
---------------------------	------------

A1. ESPECIFICAÇÕES INDICATIVAS PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	A1.1
--	-------------

A2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	A2.1
A2.1. ARFAGEM	A2.1
A2.2. CABECEIO	A2.5

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Elementos caracterizadores de uma onda regular.	4
Fig.2.2 – Ondas fazendo um ângulo α com o eixo dos x x.	8
Fig.2.3 – Trajectórias das partículas ao longo de um ciclo (as ondas vêm da esquerda).	12
Fig.2.4 – Trajectórias das partículas fluidas: em grandes profundidades (à esquerda); em profundidades intermédias (ao centro); em pequenas profundidades (à direita). As figuras não têm a mesma escala e estão exageradas para melhor compreensão.	13
Fig.2.5 – Grupos de ondas.	15
Fig.2.6 – Envolventes dos grupos de ondas.	16
Fig.2.7 – Esquema de um registo de agitação irregular.	20
Fig.2.8 – Representação da função densidade de probabilidade de Rayleigh.	23
Fig.2.9 – Representação da função distribuição de probabilidade de Rayleigh.	23
Fig.2.10 – Espectro discreto de altura de onda (à esquerda) e espectro por classes de A2/2 (à direita).	26
Fig.2.11 – Espectro contínuo.	27
Fig.2.12 – Representação do espectro empírico de Pierson-Moskowitz.	33
Fig.2.13 – Representação do espectro empírico JONSWAP.	34
Fig.3.1 – Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa.	36
Fig.3.2 – Classificação de dispositivos quanto à dimensão e/ou orientação.	37
Fig.3.3 – Funcionamento de uma CAO.	38
Fig.3.4 – Esquema do dispositivo conWEC (retirado de [15]).	39
Fig.3.5 – Funcionamento de um dispositivo de placa articulada no fundo.	40
Fig.3.6 – Antevisão do sistema bioWAVE (retirado de [19]).	41
Fig.3.7 – Esquema geral do funcionamento de um sistema de oscilação de massas.	42
Fig.3.8 – Esquema geral do funcionamento de um sistema de bombagem de água.	43
Fig.3.9 – Esquema do dispositivo AquaBuoy.	44
Fig.3.10 – Esquema do funcionamento de um sistema de roldanas.	45
Fig.3.11 – Esquema do funcionamento de um sistema de deslocamentos relativos.	46
Fig.3.12 – Esquema do funcionamento do sistema Sloped IPS Buoy (retirado de [24]).	47
Fig.3.13 – Esquema do funcionamento do sistema A.W.S.	47
Fig.3.14 – Esquema do funcionamento de um dispositivo alongado.	48
Fig.3.15 – Antevisão do dispositivo Wave Blanket (retirado de [27]).	49
Fig.3.16 – Esquema do funcionamento do dispositivo WaveMaster (retirado de [28]).	49

Fig.3.17 – Esquema do funcionamento do sistema Anaconda (as ondas vêm da esquerda) (retirado de [31]).	50
Fig.3.18 – Esquema do funcionamento de um sistema por galgamento.	51
Fig.3.19 – Esquema do funcionamento do sistema Waveplane (retirado de [35]).	52
Fig.3.20 – Antevisão do dispositivo WaveRotor (retirado de [38]).	54
Fig.3.21 – Esquema do rotor tipo Savonius do dispositivo Treefinder Ocean Wave Energy Converter. Repare-se no pormenor da flexão das pás. (retirado de [40]).	54
Fig.3.22 – Esquema do funcionamento do dispositivo Grampus. (retirado de [41]).	55
Fig.4.1 – Esquema do comportamento das forças de segunda ordem.	59
Fig.4.2 – Amarração em catenária (à esquerda) e amarração sintética (à direita).	61
Fig.4.3 – Diferentes tipos de elos: à esquerda elo com estais e à direita elos sem estais.	61
Fig.4.4 – Constituintes de um sistema de amarração.	62
Fig.4.5 – Funcionamento de uma amarração em catenária (à esquerda) e de uma amarração sintética (à direita).	63
Fig.4.6 – Diferentes configurações do sistema de amarração.	64
Fig.4.7 – Referencial para o estudo da catenária.	65
Fig.4.8 – Amarra parcialmente assente no fundo.	66
Fig.4.9 – Pequenos deslocamentos da estrutura que podem causar grandes deslocamentos das amarras.	67
Fig.5.1 – Corpo flutuante em equilíbrio estático.	71
Fig.5.2 – Corpo flutuante ligeiramente inclinado.	72
Fig.5.3 – Variação da posição do metacentro em função da inclinação.	73
Fig.5.4 – Equilíbrio de um corpo submerso.	73
Fig.5.5 – Determinação analítica do metacentro.	74
Fig.5.6 – Referencial para estudo de corpos flutuantes.	75
Fig.5.7 – Seccionamento do corpo pela superfície livre de uma onda.	83
Fig.5.8 – Variação da impulsão ao longo de um corpo com a passagem de uma onda.	84
Fig.5.9 – Factor de amplificação dinâmica vertical em função da frequência de excitação.	87
Fig.5.10 – Esquema de um sistema genérico de conversão de energia das ondas.	89
Fig.6.1 – Tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP.	93
Fig.6.2 – Sonda de nível.	94
Fig.6.3 – Câmara do sistema de aquisição de movimentos.	95
Fig.6.4 – Corte da calote esférica e do anel da rosca, desenvolvido pelo INEGI-FEUP.	96
Fig.6.5 – Esquema final do modelo estudado.	97
Fig.6.6 – Vista em planta do sistema de reflectores.	99

Fig.6.7 – Corte vertical do sistema de reflectores.....	99
Fig.6.8 – Vista do conjunto em planta e em corte.....	100
Fig.6.9 – Vista do conjunto com a calote desmontada (à esquerda) e montada (à direita).	101
Fig.6.10 – Imagem tridimensional gerada por computador do posicionamento relativo das câmaras. Ao centro está uma representação do modelo, como detectado pelo sistema de aquisição de movimentos.	101
Fig.6.11 – Exemplo de espectro resultante da análise de Fourier, aplicado a um ensaio de extinção em arfagem.	104
Fig.6.12 – Registo de ensaio de extinção, em que no final são perceptíveis batimentos.	108
Fig.6.13 – Exemplo de registo de ensaio de extinção em arfagem, com curvas de extinção ajustadas.	109
Fig.6.14 – Exemplo de registo de ensaio de extinção em cabeceio, com curvas de extinção ajustadas.	110
Fig.6.15 – Curvas do factor de amplificação dinâmica de arfagem.	111
Fig.6.16 – Curvas do factor de amplificação dinâmica de cabeceio.....	112
Fig.6.17 – Efeito Doppler (note-se que o período do movimento do corpo é bastante superior ao da onda gerada). Confrontar com a figura 6.18, correspondente ao deslocamento longitudinal em função do tempo para o mesmo ensaio.....	117
Fig.6.18 – Deslocamento longitudinal do corpo (note-se que, a partir do momento em que o corpo é submetido à acção da agitação, por volta dos 32 s, o deslocamento cresce muito rapidamente, logo há grandes velocidades longitudinais).	117
Fig.6.19 – Exemplo de registo perturbado pela luz solar. Claramente, os movimentos registados não são possíveis nas condições em que foram realizados os ensaios.	119
Fig.A1.1 – Esquema em corte do modelo previsto.	A1.1
Fig.A1.2 – Esquema das condições de ensaio.	A1.2

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação da profundidade da água	5
Tabela 2.2 – Valores de B da expressão (2.8).....	7
Tabela 3.1 – Dispositivos CAO mais significativos.	39
Tabela 3.2 – Dispositivos de placa articulada no fundo mais significativos.	41
Tabela 3.3 – Dispositivos PA de oscilação de massas mais significativos.	43
Tabela 3.4 – Dispositivos PA de bombagem de água mais significativos.	43
Tabela 3.5 – Dispositivos PA de roldana mais significativos.	45
Tabela 3.6 – Dispositivos PA de deslocamentos relativos mais significativos	46
Tabela 3.7 – Dispositivos alongados mais significativos.	48
Tabela 3.8 – Dispositivos por galgamento mais significativos.....	52
Tabela 3.9 – Dispositivos magneto-hidrodinâmicos mais significativos.	53
Tabela 6.1 – Características de massa e inércia do modelo estudado.	98
Tabela 6.2 – Características do sistema de reflectores.....	98
Tabela 6.3 – Principais características de massa do conjunto.	100
Tabela 6.4 – Principais características hidrodinâmicas do conjunto.	100
Tabela 6.5 – Principais características geométricas do conjunto.	100
Tabela 6.6 – Resultados do estudo de frequência de ressonância (Hz) em arfagem.....	104
Tabela 6.7 – Resultados do estudo de frequência de ressonância (Hz) em cabeceio.....	105
Tabela 6.8 – Resultados do estudo do coeficiente de amortecimento em arfagem.....	108
Tabela 6.9 – Resultados do estudo do coeficiente de amortecimento em cabeceio.....	109
Tabela 6.10 – Resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica em arfagem.	111
Tabela 6.11 – Resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica em cabeceio.	112
Tabela A2.1 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da curva de factor de amplificação dinâmica em arfagem na zona próxima da ressonância.	A2.1
Tabela A2.2 – Excerto dos resultados numéricos dos coeficientes de amortecimento em arfagem, na zona próxima da ressonância.	A2.2
Tabela A2.3 – Excerto dos resultados numéricos de massa adicionais em arfagem, na zona próxima da ressonância.	A2.3
Tabela A2.4 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da fase em arfagem, na zona próxima da ressonância.	A2.4
Tabela A2.5 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da curva do factor de amplificação dinâmica em cabeceio, na zona próxima da ressonância.	A2.5

Tabela A2.6 – Excerto dos resultados numéricos dos coeficientes de amortecimento em cabeceio, na zona próxima da ressonância..... A2.6

Tabela A2.7 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da inércia adicional em cabeceio, na zona próxima da ressonância..... A2.7

Tabela A2.8 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da fase em cabeceio, na zona próxima da ressonância. A2.8

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - amplitude de onda [m]

A' - máximo declive da superfície da onda [rad]

H - altura de onda [m]

\bar{H} - altura de onda média do registo [m]

$H_{1/n}$ - altura de onda com uma probabilidade de 1/n de ser excedida [m]

$\bar{H}_{1/n}$ - altura média do 1/n superior das ondas do registo, quando ordenadas por altura [m]

H_{rms} - raiz quadrática média da altura de onda do registo [m]

d - profundidade de água [m]

L - comprimento de onda [m]

L_0 - comprimento de onda em profundidade infinita [m]

C - celeridade [m/s]; coeficiente de amortecimento [kg/s ou kg.m²/s dependendo do caso]

C_0 - celeridade em profundidade infinita [m/s]

C_g - celeridade dos grupos de ondas [m/s]

$C_{g_águas_profundas}$ - celeridade dos grupos de ondas em águas profundas [m/s]

$C_{g_águas_pouco_profundas}$ - celeridade dos grupos de ondas em águas pouco profundas [m/s]

Θ - fase [rad]

T - período [s]

\bar{T} - período médio do registo[s]

$T_{1/n}$ - período de onda com uma probabilidade de 1/n de ser excedido [s]

$\bar{T}_{1/n}$ - média do 1/n superior dos períodos do registo, quando ordenados por duração [s]

T_z - período de zero ascendente [s]

T_d - período de zero descendente [s]

T_{crista} - período da crista [s]

T_{cava} - período da cava [s]

$T_{máx}$ - período da máximo do registo [s]

T_c - período entre duas cristas sucessivas (máximo relativos de um registo) [s]

η - elevação da superfície livre [m]

ξ_i - deslocamento na direcção i [m]

u - velocidade horizontal das partículas fluidas [m/s]

v - velocidade vertical da partículas fluidas [m/s]

a_i - aceleração das partículas fluidas na direcção i [m/s²]

ω - frequência angular [rad/s]
 ω_a - frequência angular de oscilação natural [rad/s]
 $\omega_{n/a}$ - frequência angular de oscilação natural sem amortecimento [rad/s]
 k - número de onda [m^{-1}]
 g - aceleração da gravidade [m/s^2]
 Φ - potencial da onda [m^2/s]
 Φ_i - potencial devido da onda incidente [m^2/s]
 Φ_D - potencial devido da onda difractada [m^2/s]
 Φ_{Ri} - potencial de radiação no grau de liberdade i [m^2/s]
 Φ_A - potencial total da onda em interacção com fronteiras sólidas [m^2/s]
 P_d - pressão dinâmica [Pa]
 P_t - pressão efectiva total [Pa]
 P_e - pressão hidrostática [Pa]
 K_p - factor de resposta da pressão [adimensional]
 E_c - energia cinética da onda [J]
 E_p - energia potencial da onda [J]
 E_t - energia total da onda [J]
 \bar{E} - energia específica da onda [J/m]
 \bar{P} - potência da onda por unidade de largura [W/m]
 N_z - número de zeros ascendentes no registo [adimensional]
 N_d - número de zeros descendentes no registo [adimensional]
 N_c - Número de cristas no registo [adimensional]
 ε -parâmetro de largura de banda espectral [adimensional]
 γ - peso volúmico da água [N/m^3]
 m_n - momento de ordem n de uma função [varia em função do caso]
 v - parâmetro de largura espectral [adimensional]
 α - constante de Phillips [adimensional]; ângulo [radianos ou graus]
 κ_i - constante de fase [rad]
 t - tempo [s]
 x - coordenada horizontal longitudinal [m]
 y - coordenada vertical [m]
 z - coordenada horizontal transversal [m]
 F_h - componente horizontal da força numa amarra [N]

F_v - componente vertical da força numa amarra [N]

w - peso linear submerso de uma amarra [N/m]

l - comprimento total de uma amarra [m]

s - coordenada paramétrica ao longo do comprimento de uma amarra [m]

F - força [N]

I - impulsão [N]

P - peso [N]

\forall - volume submerso [m³]

ρ - massa volúmica [kg/m³]

I_0 - momento inércia de área da secção transversal do corpo pelo plano da linha de água [m⁴]

C_{ij} - coeficiente de restituição na direcção i , devido a um movimento unitário na direcção j [kN/m ou kN.m/m dependendo dos graus em liberdade em causa]

S_i - momento de estático de área em relação ao eixo i [m³]

S_{ii} - momento de inércia de área em relação ao eixo i [m⁴]

S - área secção transversal de um corpo flutuante pelo plano da linha de água [m²]

m - massa [kg]

n - (quando se referir a vectores) vector unitário normal à superfície em causa e dirigido para o seu interior [m]

r - (quando se referir a vectores) vector de posição de um determinado ponto de um sólido [m]

a_{ij} - massa adicional na direcção i , devido a um deslocamento unitário na direcção j [kg ou kg.m² conforme os graus de liberdade em causa]

b_{ij} - coeficiente de amortecimento na direcção i , devido a um movimento unitário na direcção j [kg/s ou kg.m²/s conforme os graus de liberdade em causa]

b_c - coeficiente de amortecimento crítico [kg/s ou kg.m²/s dependendo do caso]

U_j - velocidade na direcção j [m/s]

\dot{U}_j - aceleração na direcção j [m/s²]

I_{ii} - Momento de inércia de massa em relação ao eixo i [kg.m²]

I_{ij} - Produto de inércia de massa em relação aos eixos i e j [kg.m²]

K - rigidez de uma mola [N/m]; número inteiro relativo arbitrário;

LC - largura de captura [m]

\bar{P}_{disp} - potência média capturada por um dispositivo de conversão de energia das ondas [W]

$\bar{P}_{máx. disp}$ - potência máxima capturada por um dispositivo de conversão de energia das ondas [W]

\bar{P}_{onda} - potência de uma onda por unidade de largura [W/m]

$\bar{P}_{\text{exercida}}$ - potência exercida por uma onda sobre um dispositivo de conversão de energia das ondas
[W]

σ - desvio padrão [varia conforme o caso]

f_p - frequência de pico [Hz]

PA - Point Absorber

CAO - Coluna de água oscilante

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IST - Instituto Superior Técnico

INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

HMPE - High modulus polyethylene

C_G - Centro de gravidade

C_I - Centro de impulsão

C_F - Centro de flutuação

M - Metacentro

IV - Infra-vermelho

FFT - Fast Fourier Transform

FAD - Factor de amplificação dinâmica

MIEC - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

1

INTRODUÇÃO

A energia das ondas representa uma importante fonte de energia renovável. A investigação mais detalhada de métodos para explorar esta fonte de energia começou na década de 70, com a crise do petróleo, a partir dos trabalhos de Stephen Salter. Após a estabilização da economia mundial, o desenvolvimento desta forma de exploração de energia estagnou.

Contudo, a partir de meados da década de 90, a crescente consciencialização dos efeitos negativos que o Ser Humano estava a incutir no meio ambiente, causados sobretudo pelo uso de combustíveis fósseis, e das suas consequências à escala global, levou à exploração de fontes de energia limpas, entre as quais, a mais vulgarizada foi a energia eólica. Mais recentemente o facto de se estar a atingir os limites da capacidade produtiva de combustíveis fósseis e a instabilidade nas regiões produtoras de petróleo, têm vindo a causar a subida dos custos energéticos, com efeitos negativos na economia mundial. Além disso, a percepção de se estar perto do fim das reservas de petróleo, gerou a necessidade de planeamento de formas de exploração de energia que o substituíssem.

Se os efeitos ambientais não tiveram o impacto desejado para impulsionar o desenvolvimento desta fonte de energia, os efeitos económicos despertaram a atenção de quase todos os governos ocidentais. Assim, perto do fim da década de 90, assistiu-se ao renascimento do desenvolvimento de métodos para explorar esta fonte de energia.

Portugal, com a sua extensa linha de costa e situando-se numa das regiões, a nível mundial, com maior potencial energético, não podia ficar atrás neste desenvolvimento. Os primeiros trabalhos em Portugal começaram na década 70 e culminaram com a instalação da primeira central nacional de energia das ondas na ilha do Pico, Açores, uma Coluna de Água Oscilante de 400 kW de potência. Recentemente, empresas privadas, como a Martifer, ou a Enerwave, também passaram a desenvolver investigação neste campo.

O presente trabalho enquadra-se nos esforços de desenvolvimento em Portugal de formas de exploração de energia das ondas. É a primeira iniciativa neste campo desenvolvida na FEUP e foi realizada em parceria com o IST, no âmbito do projecto FCT-PTCD/EME-MFE/66999/2006.

Com este trabalho pretende-se efectuar o estudo experimental de um sistema genérico de produção de energia das ondas, com vista à obtenção de dados para auxiliar a validação e desenvolvimento de modelos em estudo no IST.

2

A ENERGIA E O FLUXO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

2.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das teorias que modelam a agitação marítima é fundamental para a exploração e desenvolvimento de sistemas de conversão de energia das ondas. A partir delas é possível estimar as solicitações de um corpo instalado no mar, determinar o potencial energético de uma determinada localização, o rendimento de um dispositivo e as suas condições óptimas de exploração, etc.

O objectivo deste capítulo é apresentar as características principais do comportamento de uma onda, ou de um estado de agitação, fundamental para a correcta compreensão do capítulo 4 “Os dispositivos de aproveitamento de energia das ondas e análise comparativa do seu funcionamento”, bem como das características de energia e potência das ondas (recurso que se procura explorar).

Na primeira parte será feita uma exposição do transporte energético em condições regulares, segundo a teoria Linear, ou de Airy. Na segunda parte será feita uma descrição das duas abordagens fundamentais no estudo de agitação em condições irregulares e de metodologias para a estima da energia de um estado de agitação irregular. No entanto, em qualquer das partes apenas será estudada agitação unidireccional, devendo ter-se consciência que esta corresponde a uma simplificação.

2.2. AGITAÇÃO REGULAR

2.2.1. INTRODUÇÃO

A agitação regular constitui a forma mais simples de representar uma onda gravítica, matematicamente descrita através da Teoria linear, ou de Airy. Esta teoria considera que a onda é sinusoidal e que o movimento é puramente oscilatório, isto é, as partículas excitadas pela onda descrevem trajetórias fechadas, voltando à posição inicial após um período de tempo, designado por período da onda. Nesta condição, apesar de haver movimento das partículas, não há transporte de massa em qualquer direcção (o deslocamento médio das partículas do fluido é nulo).

A teoria linear assenta nos seguintes pressupostos:

- o fluido é homogéneo e incompressível;
- o efeito da tensão superficial é desprezável;
- o efeito de Coriolis devido à rotação da Terra é desprezável;
- a pressão na superfície livre é uniforme e constante;
- o fluido é ideal (não tem viscosidade);

- o escoamento é irrotacional;
- o leito do mar é horizontal e plano (o que implica que as velocidades verticais no fundo sejam nulas);
- a amplitude da onda é pequena em relação ao comprimento de onda;
- a forma da onda não varia no tempo nem no espaço;
- as ondas são planas com cristas e cavas bem definidas.

2.2.2. ELEMENTOS CARACTERIZADORES DE UMA ONDA

Os elementos básicos que caracterizam uma onda são os seguintes, figura 2.1:

- Comprimento de onda, L , distância entre duas cristas ou duas cavas sucessivas de uma onda que se propaga numa determinada profundidade; de uma forma geral, distância entre dois pontos desfasados de 360° ;
- Período, T , intervalo de tempo correspondente à passagem de duas cristas ou duas cavas sucessivas por um dado ponto; tempo que a onda demora a percorrer uma distância igual ao seu comprimento;
- Celeridade, C , velocidade de propagação da onda numa dada profundidade;
- Crista é ponto mais alto de uma onda;
- Cava é ponto mais baixo de uma onda;
- Amplitude, A , distância, medida na vertical, entre uma crista, ou uma cava, e o nível estático da água. É indiferente considerar crista ou cava pois, quando a onda é sinusoidal, esta distância é igual nos dois casos;
- Altura de onda, H , distância, medida na vertical, entre uma crista e uma cava sucessivas;
- Número de onda, k , igual a $2\pi / L$;
- Frequência angular, ω igual a $2\pi / T$;
- Fase, θ , igual a $kx - \omega t$.

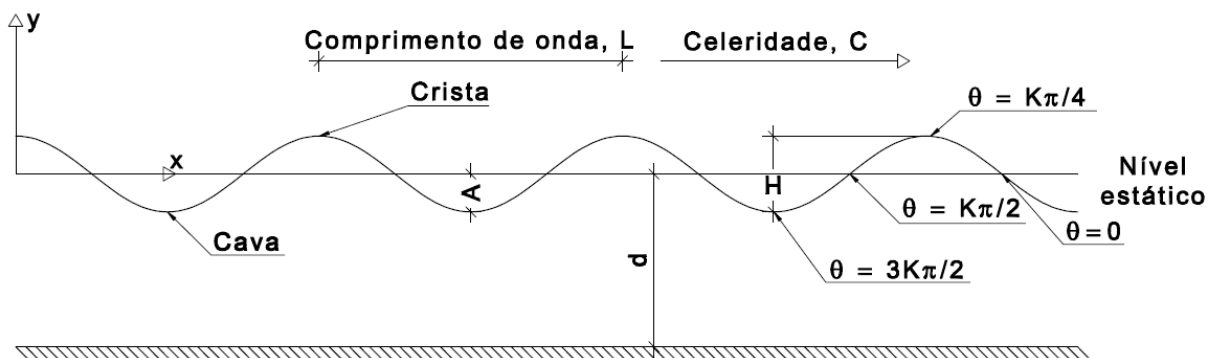


Fig.2.1 – Elementos caracterizadores de uma onda regular.

Poderão ser também referidos outros elementos que estão associados à seguinte notação:

- L_0 – comprimento de onda em grandes profundidades;
- C_0 – celeridade da onda em grandes profundidades;
- C_g – celeridade do grupo de ondas;
- x – posição, medida na horizontal, em relação à origem das coordenadas;
- y – posição, medida na vertical; o zero está ao nível da superfície livre em repouso;
- t – instante de tempo;

- d – profundidade da água;
- a_x – aceleração na direcção x ;
- a_y – aceleração na direcção y ;
- ξ_x - deslocamento da partícula de água na direcção x ;
- ξ_y - deslocamento da partícula de água na direcção y ;
- η - Elevação da superfície livre.

2.2.3. CELERIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA

Como foi anteriormente definido, a celeridade é a razão entre o espaço percorrido por uma onda e o tempo que demora a fazê-lo. Tendo em conta que no intervalo de tempo igual a um período, a onda percorre o espaço correspondente ao seu comprimento:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.1)$$

A profundidade da água a que a onda se desloca influencia a celeridade e o comprimento de onda, tornando conveniente considerar separadamente o que se passa nas diferentes gamas de profundidade relativa, d/L , tabela 2.1.

Tabela 2.1 Classificação da profundidade da água

d/L	Classificação da profundidade
$d/L \rightarrow \infty$	Profundidades infinitas
$d/L > 1/2$	Grandes profundidades
$1/20 < d/L < 1/2$	Profundidades intermédias [1]
$1/25 < d/L < 1/2$	Profundidades intermédias [2]
$d/L < 1/20$	Pequenas profundidades [1]
$d/L < 1/25$	Pequenas profundidades [2]

Na análise que se segue admite-se que, embora C e L variem com a profundidade, T permanece constante.

Em profundidades infinitas o fundo não terá influência no comportamento da onda. Neste caso o comprimento de onda e a celeridade dependem apenas do período. Assim ([1], [2]):

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.2)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.3)$$

Como a profundidade nunca é infinita, tem sempre alguma influência na celeridade e comprimento de onda. A primeira pode ser calculada pela seguinte expressão ([1], [2]):

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.4)$$

ou, tendo em conta a expressão (2.1),

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.5)$$

Relacionando a expressão (2.5) com a expressão (2.1) obtém-se a expressão que permite o cálculo do comprimento de onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.6)$$

As três equações anteriores, (2.4), (2.5) e (2.6), são exactas, isto é, não apresentam simplificações e podem ser aplicadas a qualquer profundidade. No entanto, a sua aplicação levanta problemas, visto que a expressão (2.6) é implícita e, por isso, tem que ser resolvida de forma iterativa. As expressões (2.4) e (2.5) podem ser resolvidas de forma simples, se for conhecido o valor de L. A expressão (2.4), porém, é também implícita, o que impossibilita a sua resolução relativamente a L; mas esta mesma particularidade permite que, quando utilizado um processo iterativo, se possa utilizar esta expressão para determinar em simultâneo C e L (quando nem C nem L forem conhecidos), o que tem vantagens se for possível utilizar um programa de cálculo.

As dificuldades resultantes da aplicação das expressões (2.4), (2.5), e (2.6) conduziram à utilização de aproximações, Eckart (1952) e Elias (1971):

$$L \approx \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 d}{T^2 g}\right)} \quad (2.7)$$

$$L \approx \sqrt{\frac{2\pi d}{L_0}} \left(1 - B \frac{d}{L_0}\right) L_0 \quad (2.8)$$

em que B representa uma constante que depende de d/L_0 , ver tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de B da expressão (2.8).

d/L_0	B	Erro
$\leq 0,10$	1,052	$<0,1\%$
$0,10 \leq d/L_0 \leq 0,15$	1,049	$<0,3\%$
$0,15 \leq d/L_0 \leq 0,20$	1,041	$<1\%$

Para pequenas profundidades relativas, $d/L < 1/25$ a $1/20$, a expressão (2.4) pode ser simplificada, obtendo-se (expressão de Lagrange):

$$C = \sqrt{gd} \quad (2.9)$$

Para grandes profundidades relativas, $d/L > \frac{1}{2}$, $\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = 0,9964$ e portanto:

$$L \approx \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.10)$$

$$C \approx \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (2.11)$$

Estas equações são, respectivamente, a do comprimento de onda e a da celeridade em águas de profundidade infinita.

Dividindo a expressão (2.5) pela expressão (2.3) e a expressão (2.6) pela expressão (2.2) obtém-se:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{L}{L_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \tanh(kd) \quad (2.12)$$

Multiplicando ambos os membros da expressão anterior por d/L obtém-se:

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{d}{L} \tanh(kd) \quad (2.13)$$

As expressões nesta forma podem facilitar o trabalho de cálculo.

2.2.4. CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS

A forma sinusoidal da superfície livre de uma onda regular é dada, de acordo com a Teoria Linear, pela seguinte expressão ([1], [2]):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

para uma onda deslocando-se no sentido positivo do eixo dos xx . Note-se que se considera que a onda apenas se desloca ao longo do eixo dos xx . No caso mais geral, uma onda poderá deslocar-se numa direcção fazendo um determinado ângulo α com o eixo dos xx , figura 2.2.

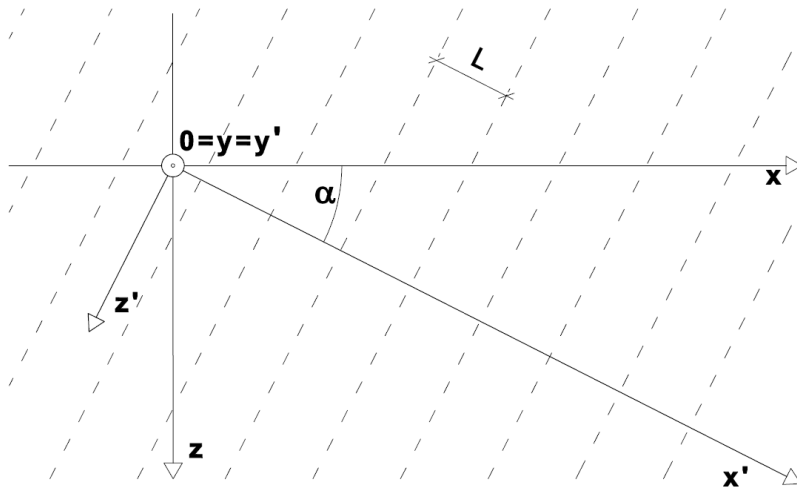


Fig.2.2 – Ondas fazendo um ângulo α com o eixo dos x .

Neste caso, considere-se um referencial $x'y'z'0$, em que x' é paralelo à direcção de propagação da onda e orientado positivamente no sentido do seu deslocamento. Verifica-se que:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x'}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) = \frac{H}{2} \cos(kx' - \omega t) \quad (2.15)$$

e que:

$$x' = x \cos(\alpha) + z \sin(\alpha) \quad (2.16)$$

Substituindo (2.16) em (2.15) obtém-se:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi x \cos(\alpha)}{L} + \frac{2\pi z \sin(\alpha)}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) = \frac{H}{2} \cos(kx \cos(\alpha) + kz \sin(\alpha) - \omega t) \quad (2.17)$$

Sempre que a direcção de propagação da onda faça um ângulo α com o eixo dos xx , será esta a transformação a aplicar. Por simplificação, nos pontos seguintes, considerar-se-á que a direcção de propagação é coincidente com o eixo dos xx e que a onda se desloca no sentido positivo do mesmo.

2.2.5. POTENCIAL DE VELOCIDADES

A consideração de irrotacionalidade permite que se afirme que as velocidades geradas no fluido podem ser obtidas através do gradiente de uma dada função, o potencial de velocidades, ϕ , [3]:

$$\phi = \phi(x, y, t) = \frac{gA}{\omega} \frac{\cosh(k(y+d))}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.18)$$

Calculando o gradiente do potencial de velocidades obtêm-se as velocidades na direcção x e y . Assim, designando por u a velocidade na direcção x e v a velocidade na direcção y , obtêm-se:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(\theta) \quad (2.19)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(\theta) \quad (2.20)$$

Tenha-se em atenção o seguinte pormenor: a fase, θ , é uma característica de um determinado ponto de uma determinada onda. Por exemplo, as cristas terão sempre fases de valor $K\pi$, figura 2.1, em que K é um número inteiro relativo. Independentemente da localização de uma determinada onda, a fase da sua crista será sempre a mesma, isto é, kx cresce ao mesmo ritmo que ωt decresce. Por outro lado, as cavas terão sempre fases de valor $K\pi/2$, figura 2.1, verificando-se o mesmo que sucede para as cristas, no que diz respeito à constância da fase. E isto, tal como para a crista e para a cava, acontece com todos os pontos ao longo do comprimento de uma onda.

Isto significa que, considerando a fase constante (isto é, admitindo que se está a acompanhar, por exemplo, uma crista ou uma cava), independentemente do instante e da posição da onda, θ é constante (logo $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$ também o são). Se as expressões (2.19) e (2.20) forem aplicadas a uma determinada profundidade de água também d , H e L serão constantes. Nessa situação as velocidades, ao longo de uma vertical, podem ser definidas como:

$$u = B_1 \cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right) \quad (2.21)$$

$$v = B_2 \sinh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right) \quad (2.22)$$

em que B_1 , B_2 são constantes. Sendo $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ e $\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ verifica-se um decréscimo aproximadamente exponencial da velocidade com a cota.

Fazendo uma análise semelhante para a fase, mantendo constante a cota, y , verifica-se que a velocidade horizontal é máxima quando $\cos(\theta)$ for igual a 1 ou a - 1, isto é, quando θ for igual 0 ou $K\pi$. Por sua vez, a velocidade vertical é máxima quando $\sin(\theta)$ for igual a 1 ou a - 1, isto é, quando θ for igual $K\pi/2$ ou $3K\pi/2$. Tendo em conta a expressão (2.14), que define a elevação da superfície livre, as velocidades horizontais são máximas na vertical da crista (θ igual a 0) e na vertical da cava (θ igual a $K\pi$) e as velocidades verticais são máximas na vertical dos pontos médios (θ igual a $K\pi/2$ e θ igual $3K\pi/2$).

Por derivação das expressões de velocidade em relação ao tempo, obtêm-se as expressões da aceleração:

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(\theta) \quad (2.23)$$

$$a_y = -\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(\theta) \quad (2.24)$$

Uma análise semelhante à realizada para as expressões de velocidade mostra que as acelerações também decrescem exponencialmente com a cota. Além disso, as acelerações em y são máximas quando $\cos(\theta)$ for igual a 1 ou a - 1, isto é, quando θ for igual a 0 ou a $K\pi$ (vertical da crista e da cava). As acelerações em x são máximas quando $\sin(\theta)$ for igual a 1 ou a - 1, isto é, quando θ for igual a $K\pi/2$ ou a $3K\pi/2$ (vertical dos pontos médios).

Por integração das equações de velocidade em relação ao tempo, desprezando quantidades de segunda ordem, obtêm-se as equações dos deslocamentos das partículas fluidas na direcção x e na direcção y :

$$\xi_x = -\frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\cosh\left(2\pi \frac{(y_0 + d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(kx_0 - \omega t) \quad (2.25)$$

$$\xi_y = \frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\sinh\left(2\pi \frac{(y_0 + d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (2.26)$$

em que x_0 e y_0 são as coordenadas da posição média da partícula ao longo de um ciclo. Tal como para a aceleração e para a velocidade, verifica-se um decréscimo exponencial dos deslocamentos das partículas com a cota. Além disso, verifica-se que o deslocamento em y é máximo quando $\cos(\theta)$ é igual a 1 ou -1, isto é, θ for igual 0 ou a $K\pi$ (vertical da crista e da cava). O deslocamento em x é máximo quando $\sin(\theta)$ é igual 1 ou a -1, isto é, quando θ for igual a $K\pi/2$ ou a $3K\pi/2$ (vertical dos pontos médios). Isto é relativamente evidente, uma vez que a crista e a cava são, respectivamente, o ponto mais alto e o mais baixo de uma onda.

Sendo que,

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi g}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.27)$$

as equações (2.25) e (2.26) podem escrever-se como:

$$\xi_x = -\frac{H}{2} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(y_0 + d)}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(kx_0 - \omega t) \quad (2.28)$$

$$\xi_y = \frac{H}{2} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi(y_0 + d)}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (2.29)$$

Resolvendo as equações (2.28) e (2.29) em relação às funções trigonométricas $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$ e elevando ao quadrado obtém-se:

$$\sin(kx_0 - \omega t)^2 = \left(\frac{\xi_x}{H/2} \frac{\sinh(2\pi d/L)}{\cosh(2\pi(y_0 + d)/L)} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$\cos(kx_0 - \omega t)^2 = \left(\frac{\xi_y}{H/2} \frac{\sinh(2\pi d/L)}{\sinh(2\pi(y_0 + d)/L)} \right)^2 \quad (2.31)$$

$$\sin(kx_0 - \omega t)^2 + \cos(kx_0 - \omega t)^2 = \left(\frac{\xi_x}{H/2} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi(y_0 + d)}{L}\right)} \right)^2 + \left(\frac{\xi_y}{H/2} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi(y_0 + d)}{L}\right)} \right)^2 \quad (2.32)$$

$$1 = \frac{\xi_x^2}{\left(\frac{H \cosh(2\pi(y_0 + d)/L)}{2 \sinh(2\pi d/L)} \right)^2} + \frac{\xi_y^2}{\left(\frac{H \sinh(2\pi(y_0 + d)/L)}{2 \sinh(2\pi d/L)} \right)^2} \quad (2.33)$$

$$1 = \frac{\xi_x^2}{B_3^2} + \frac{\xi_y^2}{B_4^2} \quad (2.34)$$

em que B_3 e B_4 são constantes, se a expressão (2.33) for aplicada a uma dada profundidade e a uma determinada cota.

Pela expressão (2.34) verifica-se que as trajectórias das partículas são elipses fechadas (as partículas regressam à posição inicial após um ciclo, figura 2.3) com um eixo maior horizontal igual B_3 e um eixo menor vertical igual B_4 .

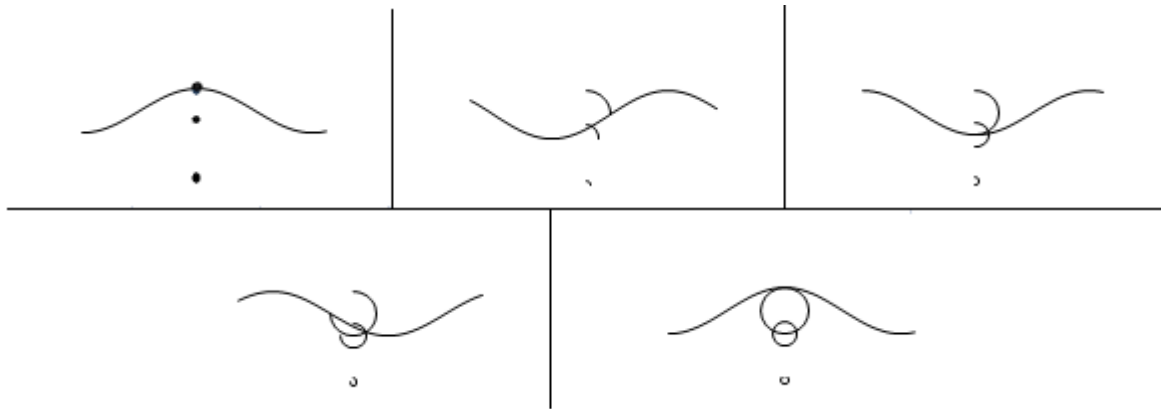


Fig.2.3 – Trajectórias das partículas ao longo de um ciclo (as ondas vêm da esquerda).

Pela expressão (2.33) verifica-se que as dimensões dos eixos da elipse decrescem de forma aproximadamente exponencial com a cota, figura 2.3 e figura 2.4, o que está de acordo com as conclusões tiradas aquando da análise das expressões (2.25) e (2.26).

Quando $d/L > \frac{1}{2}$ tem-se que [2]:

$$B_3 = B_4 = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi d}{L}} \quad (2.35)$$

Os eixos B_3 e B_4 são iguais, isto é, para águas profundas as trajectórias são circulares, figura 2.4.

Para $d/L < 1/25$ a $1/20$ tem-se que [2]:

$$B_3 = \frac{H}{2} \frac{L}{2\pi d} \quad (2.36)$$

$$B_4 = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{y}{d} \right) \quad (2.37)$$

O eixo B_4 é menor do que o eixo B_3 , que é aproximadamente constante, isto é, para águas pouco profundas as trajectórias são elipses com eixo maior horizontal e eixo menor vertical, decrescente com a cota, figura 2.4. Este efeito nas trajectórias também se verifica em águas de profundidades intermédias. Neste caso, a variação das trajectórias é uma situação intermédia entre o que se verifica em águas profundas e o que se verifica em águas pouco profundas: as trajectórias são elípticas (mas não tão pronunciadas como em águas profundas) e tanto o eixo maior, como o eixo menor, sofrem um decréscimo aproximadamente exponencial com a cota, figura 2.4.

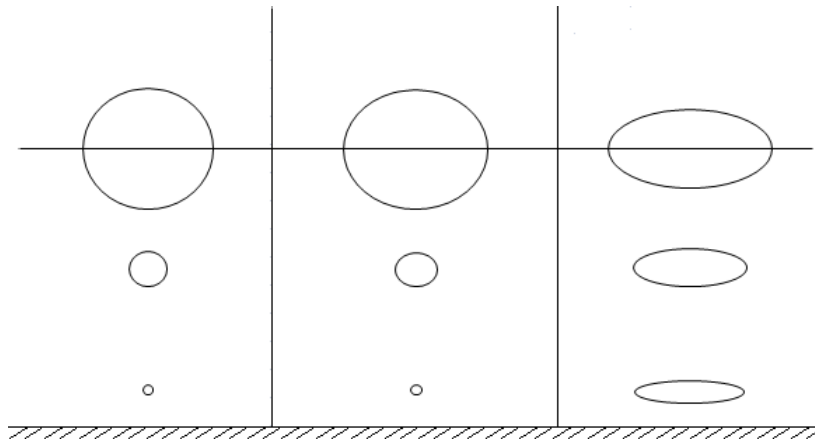


Fig.2.4 – Trajectórias das partículas fluidas: em grandes profundidades (à esquerda); em profundidades intermédias (ao centro); em pequenas profundidades (à direita). As figuras não têm a mesma escala e estão exageradas para melhor compreensão.

2.2.6. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

A passagem de uma onda cria uma perturbação no fluido, com a conseqüente alteração da pressão. A perturbação da pressão gerada por uma onda é dada pela seguinte expressão ([1], [2]):

$$P_d = \frac{\rho g H \cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{2 \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(\theta) \quad (2.38)$$

Como a elevação da superfície livre é dada por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(\theta) \quad (2.39)$$

então:

$$P_d = \rho g \eta \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.40)$$

A pressão efectiva total é obtida somando-se a pressão dinâmica à pressão estática:

$$P_t = P_d + P_e = \rho g \eta \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(y+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} - \rho g y \quad (2.41)$$

em que P_t representa a pressão total, ou seja,

$$P_t = \rho g (\eta K_p - y) \quad (2.42)$$

e sendo K_p denominado por factor de resposta de pressão.

À superfície $y = 0$, logo $K_p = 1$; no fundo $y = -d$, logo $K_p = \frac{1}{\cosh(kd)}$.

A diferença de pressão entre a crista e cava, que pode ser registada por um ondógrafo, será igual a:

$$\Delta p = \frac{H}{\cosh(kd)} \quad (2.43)$$

o que permite obter a altura da onda de forma indirecta.

Na realidade a expressão (2.43) tem que ser multiplicada por um factor correctivo que, segundo [1], varia entre 1 e 1,37.

2.2.7. GRUPOS DE ONDAS

Quando se está na presença de ondas com períodos e comprimentos diferentes geram-se, entre elas, fenómenos de interferência, conhecidos como batimentos, que originam os chamados grupos de ondas, figura 2.5. Estes, compostos por ondas de diferentes alturas, repetem-se ciclicamente.

Considerando duas ondas propagando-se na mesma direcção, com a mesma altura, mas com períodos e comprimentos ligeiramente diferentes, a elevação da superfície livre será dada por:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_1} - \frac{2\pi t}{T_1}\right) + \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_2} - \frac{2\pi t}{T_2}\right) \quad (2.44)$$

Como as ondas têm períodos e comprimentos diferentes, as suas fases não variam de igual modo, quer no tempo, quer no espaço. Como consequência vai haver posições e instantes em que as duas fases têm uma diferença de 180° e posições e instantes em que a diferença é de 0° . Quando a diferença for de 180° a crista de uma onda corresponde à cava de outra e as duas componentes anulam-se, não havendo variação do nível de água, figura 2.5. Nos pontos em que a diferença é de 0° a crista de uma onda corresponde à crista da outra, ou a cava de uma onda corresponde à cava de outra, e as duas componentes somam-se, resultando numa variação da altura de água de $2H$ ou $-2H$, o dobro da altura de onda inicial, figura 2.5.

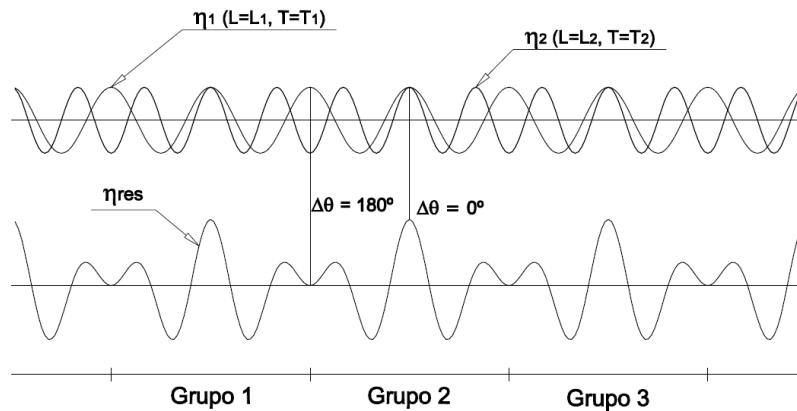


Fig.2.5 – Grupos de ondas.

A expressão que descreve a envolvente dos grupos, figura 2.6, é a seguinte:

$$\eta_{env} = \pm H \cos \left(\pi \left(\frac{L_2 - L_1}{L_2 L_1} \right) x - \pi \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right) t \right) \quad (2.45)$$

em que η_{env} representa a elevação da envolvente.

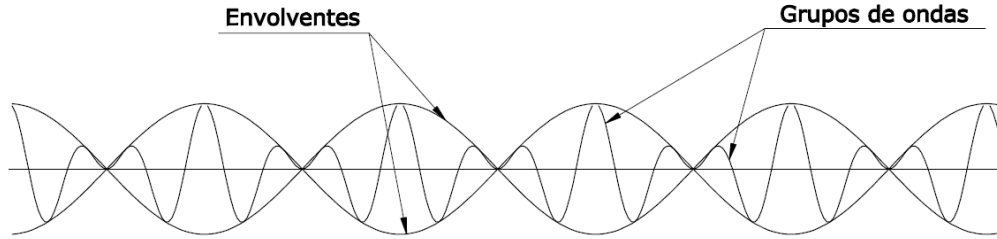


Fig.2.6 – Envolventes dos grupos de ondas.

No limite, quando T_1 está muito próximo de T_2 e L_1 muito próximo de L_2 , a velocidade aparente de propagação dos grupos, isto é, dos batimentos, é igual a ([1], [2]):

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{L}{T} \left(1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh \left(\frac{4\pi d}{L} \right)} \right) \quad (2.46)$$

Tendo em conta a expressão (2.1) e definindo n como:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh \left(\frac{4\pi d}{L} \right)} \right) \quad (2.47)$$

obtem-se:

$$C_g = n C \quad (2.48)$$

em que C representa a celeridade da onda na profundidade em estudo.

Em águas profundas $\frac{4\pi d}{L} \left/ \sinh \left(\frac{4\pi d}{L} \right) \approx 0 \right.$, logo $n \approx \frac{1}{2}$. Assim,

$$C_{g \text{ águas profundas}} = n_{\text{águas profundas}} C_{\text{águas profundas}} = n_{\text{águas profundas}} C_0 = \frac{1}{2} C_0 \quad (2.49)$$

Em águas pouco profundas $\sinh \left(\frac{4\pi d}{L} \right) \approx \frac{4\pi d}{L}$, logo $n \approx 1$. Assim:

$$C_{g \text{ águas pouco profundas}} = n_{\text{águas pouco profundas}} C_{\text{águas pouco profundas}} = 1 \times \sqrt{gd} = \sqrt{gd} \quad (2.50)$$

Da análise das equações apresentadas resulta o seguinte:

- em águas profundas as ondas mais compridas movem-se mais rapidamente do que as mais curtas (ondas dispersivas ou ondas propagando-se em meios dispersivos, isto é, meios em que a celeridade depende do comprimento de onda);
- em águas pouco profundas as ondas movem-se todas com a mesma velocidade.

2.2.8. ENERGIA E POTÊNCIA DE UMA ONDA

A energia de uma onda divide-se em duas parcelas: a energia cinética, devida à velocidade das partículas, e a energia potencial, resultante da massa de água acima da cava.

A energia cinética de uma onda, por unidade de largura, pode ser obtida pela seguinte expressão [2]:

$$E_c = \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} \rho \frac{u^2 + v^2}{2} dy dx \quad (2.51)$$

A sua integração, ao longo do comprimento da onda e ao longo da profundidade da água, resulta na seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.52)$$

em que E_c representa a energia cinética total por unidade de largura. Convém fazer referência ao trabalho desenvolvido por [4]. Estes autores desenvolveram uma metodologia para a determinação da energia cinética de uma onda, em função da profundidade, a partir das componentes das velocidades das partículas fluidas, ao invés do método apresentado acima, que se baseia no valor de H e L . Esta metodologia apresenta-se como uma alternativa potencial ao estudo de agitação irregular (a ver mais à

frente) onde os métodos de avaliação de energia para ondas regulares não podem ser aplicados, ou estão fortemente limitados.

A energia potencial de uma onda, por unidade de largura, pode ser obtida pela expressão seguinte [2]:

$$E_p = \int_x^{x+L} \rho g \left(\frac{(\eta + d)^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right) dx \quad (2.53)$$

A sua integração, ao longo do comprimento da onda, resulta, por sua vez, na seguinte expressão:

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.54)$$

em que E_p representa a energia potencial total por unidade de largura.

A energia total, E_t , é obtida pela soma das duas parcelas:

$$E_t = E_p + E_c = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (2.55)$$

Dividindo a energia total pelo comprimento de onda, obtém-se a energia específica (energia por unidade de área) \bar{E} , igual a:

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.56)$$

O fluxo de energia, ou potência, por unidade de largura de uma onda define-se como a quantidade de energia da onda que atravessa um plano vertical, perpendicular à direcção de propagação da onda, compreendendo toda a profundidade, por unidade de tempo. A potência média de uma onda, ou fluxo de energia médio, \bar{P} , por unidade de largura, pode ser obtida pela seguinte expressão [2]:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \rho u \, dy \, dt \quad (2.57)$$

A sua integração, ao longo de um período e ao longo da sua profundidade, resulta na seguinte expressão:

$$\bar{P} = \bar{E} n C = \bar{E} C_g \quad (2.58)$$

em que n é o parâmetro representado pela expressão (2.47).

Se for pretendida a potência em relação a um plano vertical que faz um determinado ângulo com a direcção de propagação,

$$\bar{P}_\alpha = \bar{E} n C \sin(\alpha) = \bar{E} C_g \sin(\alpha) \quad (2.59)$$

em que \bar{P}_α é a potência em relação a um dado plano e α o ângulo entre o plano e a direcção de propagação.

Tendo em conta o que foi referido em 2.2.7 para águas profundas, ou seja, $C_g = \frac{1}{2} C_0$, e a expressão (2.58), pode escrever-se:

$$\bar{P}_{\text{águas_profundas}} = \frac{1}{2} \bar{E}_0 C_0 \quad (2.60)$$

em que $\bar{P}_{\text{águas_profundas}}$ é a potência média em águas profundas.

Para águas pouco profundas, $n=1$, logo $C_g = C$. Assim:

$$\bar{P}_{\text{águas_pouco_profundas}} = \bar{E} C_{\text{águas_pouco_profundas}} = \bar{E} \sqrt{gd} \quad (2.61)$$

em que $\bar{P}_{\text{águas_pouco_profundas}}$ é a potência média em águas pouco profundas.

Admitindo que as batimétricas são rectilíneas, se as frentes de onda lhes forem paralelas e não houver adição ou perda de energia, então:

$$\bar{E}_0 n_0 C_0 = \bar{E} n C \quad (2.62)$$

Como $n_0=1/2$,

$$\frac{1}{2} \bar{E}_0 C_0 = \bar{E} n C \quad (2.63)$$

Se as frentes de onda não forem paralelas às batimétricas, a onda propaga-se com celeridades diferentes ao longo da sua largura, devido à refração, e a expressão anterior já não pode ser aplicada.

2.3. AGITAÇÃO IRREGULAR

2.3.1. INTRODUÇÃO

Ao contrário da situação idealizada anteriormente, a superfície do mar não apresenta características regulares. A irregularidade verifica-se em relação à altura, período e comprimento de onda. Mais do que a simples irregularidade, não há actualmente nenhuma lei formulada que permita descrever a variabilidade natural da superfície do mar. Isto é, a elevação da superfície marinha é, tanto quanto se pode saber, um processo fundamentalmente aleatório. Assim sendo, é necessário recorrer a métodos estatísticos para estudar as condições reais de agitação. Este estudo pode ser feito por duas abordagens distintas: análise no domínio do tempo e análise no domínio da frequência.

A análise no domínio do tempo parte de um registo temporal da elevação da superfície livre, em um ou mais pontos, procura individualizar as várias ondas e depois fazer o seu tratamento estatístico. A análise no domínio da frequência parte do mesmo registo temporal da elevação superfície livre e procura fazer o seu tratamento recorrendo às Transformadas de Fourier. Em qualquer dos métodos o estado de agitação deve poder ser considerado estacionário, isto é, que as suas características fundamentais não variam no tempo de duração do registo.

2.3.2. PARÂMETROS DE UM ESTADO DE AGITAÇÃO IRREGULAR

Na figura 2.7 apresenta-se um esquema de um registo da variação superfície livre num determinado ponto, em função do tempo. A sua análise suscita as seguintes questões:

Como definir a altura de onda? Como definir o período da onda? Ou, de uma forma mais geral, como definir o que é uma onda, num registo que apresenta estas características?

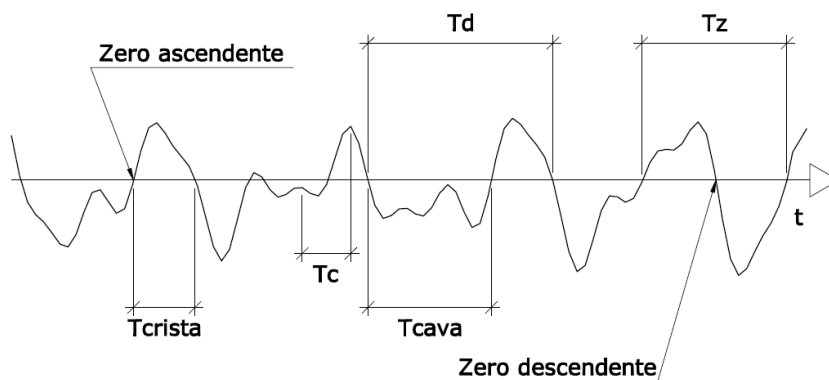


Fig.2.7 – Esquema de um registo de agitação irregular.

Para resolver estas questões existem várias metodologias. No entanto, sejam elas quais forem, o período, a altura, ou outras características das ondas, nunca serão constantes. O método mais divulgado para resolução deste problema é o método do *zero-crossing*, que tem duas variantes: o método dos zeros ascendentes e o método dos zeros descendentes.

No método dos zeros ascendentes uma onda é definida como o perfil da superfície livre entre dois pontos sucessivos em que a superfície livre cruza o nível médio com sentido ascendente. No método dos zeros descendentes uma onda é definida como o perfil da superfície livre entre dois pontos

sucessivos em que a superfície livre cruza o nível médio com sentido descendente. Assim, pode definir-se:

- altura de onda de zero ascendente: diferença de cota entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo de uma onda de zero ascendente;
- altura de onda de zero descendente: diferença de cota entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo de uma onda de zero descendente.

É de salientar que, em ambos os métodos, para efeitos desta análise, qualquer ondulação que não cruze o nível médio da superfície livre não é considerada como onda.

Dos dois métodos apresentados, o mais utilizado é o dos zeros ascendentes.

Adicionalmente, podem também definir-se os seguintes parâmetros:

- N_z , número de zeros ascendentes no registo;
- N_d , número de zeros descendentes no registo;
- N_c , Número de cristas no registo;
- T_z , período de zero ascendente: intervalo de tempo entre dois zeros ascendentes sucessivos;
- T_d , período de zero descendente: intervalo de tempo entre dois zeros descendentes sucessivos;
- T_{crista} , período da crista: intervalo de tempo decorrido entre um zero ascendente e o zero descendente seguinte;
- T_{cava} , período da cava: intervalo de tempo entre um zero descendente e o zero ascendente seguinte;
- T_c , período entre duas cristas sucessivas (máximos relativos).

A irregularidade da superfície do mar torna difícil a caracterização de um determinado estado de agitação. Para o facilitar definiram-se alguns parâmetros:

- \bar{H} : altura de onda média;
- $H_{1/3}$: altura de onda com uma probabilidade de 1/3 de ser excedida;
- $\bar{H}_{1/3}$: altura média do terço superior das ondas do registo, quando ordenadas por altura;
- $H_{1/n}$: altura de onda com uma probabilidade de 1/n de ser excedida;
- $\bar{H}_{1/n}$: altura média do 1/n superior das ondas do registo, quando ordenadas por altura;
- H_{rms} : raiz quadrática média da altura de onda;
- \bar{T} : período médio;
- $T_{1/3}$: período de onda com uma probabilidade de 1/3 de ser excedido;
- $\bar{T}_{1/3}$: média do terço superior dos períodos do registo, quando ordenados por duração;
- $T_{1/n}$: período de onda com uma probabilidade de 1/n de ser excedido;
- $\bar{T}_{1/n}$: média do 1/n superior dos períodos do registo, quando ordenados por duração.

Os parâmetros $\bar{H}_{1/3}$ e $\bar{T}_{1/3}$ são designados, respectivamente, altura de onda significativa, ou H_s , e período de onda significativo, T_s . Em alguns estudos, como os de transporte sólido, ou o de dimensionamento de quebra-mares de taludes, admite-se que um estado de agitação real caracterizado por H_s , produz os mesmos efeitos que uma onda regular de altura H igual H_s .

Naturalmente, quanto maiores forem estes parâmetros, mais severo será o estado de agitação registado.

2.3.3. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A análise no domínio do tempo procura individualizar cada onda no registo. Após individualizadas, este método faz uma análise estatística do conjunto das ondas. Obtêm-se, então, parâmetros que procuram descrever o estado de agitação registado. Para que esta forma de análise possa ser executada, os registos têm que ter uma duração suficiente para conter várias centenas de ondas, de modo a que os parâmetros estatísticos determinados possam ser representativos do estado de agitação que se quer caracterizar. O registo de agitação estudado deve ser estacionário, isto é, as características do estado de agitação não devem variar no tempo (pelo menos no tempo de duração do registo). No caso de estas condições se verificarem, podem aplicar-se determinadas distribuições estatísticas aos registos. Estudos numerosos levaram à conclusão que as distribuições que mais eficazmente se adaptam aos registos de agitação são as distribuições de Gauss e de Rayleigh.

A distribuição de Gauss adapta-se a registos da elevação da superfície livre e toma a seguinte forma:

$$f(\eta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\eta - \bar{\eta})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.64)$$

$$F(\eta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\eta} \exp\left(-\frac{(\eta - \bar{\eta})^2}{2\sigma^2}\right) d\eta \quad (2.65)$$

em que η é a elevação da superfície livre, $\bar{\eta}$ a elevação média da superfície livre e σ o desvio padrão da elevação da superfície livre. A expressão (2.64) corresponde à função densidade de probabilidade e a expressão (2.65) corresponde à função distribuição de probabilidade. Esta distribuição tem, no entanto, pouca aplicação, uma vez que, geralmente, o que se pretende estudar é a altura de onda.

A distribuição de Rayleigh é especialmente adequada para descrever a variável altura de onda de zero ascendente. Nesse caso, a distribuição toma a seguinte forma ([2], [5]):

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left(-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right) \quad (2.66)$$

$$F(H) = 1 - \exp\left(-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right) \quad (2.67)$$

em que H_{rms} é a altura de onda média quadrática do registo. A expressão (2.66) corresponde à função densidade de probabilidade, figura 2.8, e a expressão (2.67) corresponde à função distribuição de probabilidade, figura 2.9.

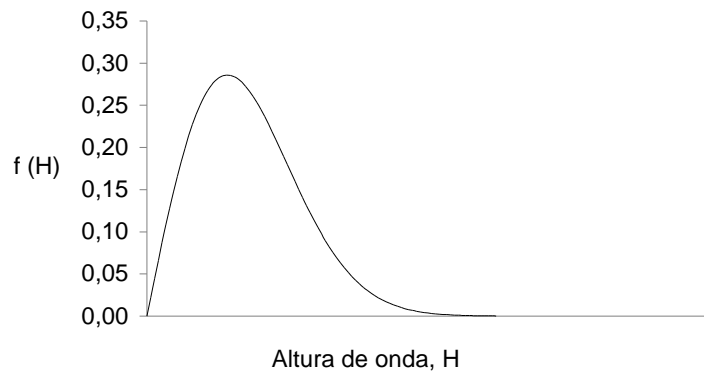


Fig.2.8 – Representação da função densidade de probabilidade de Rayleigh.

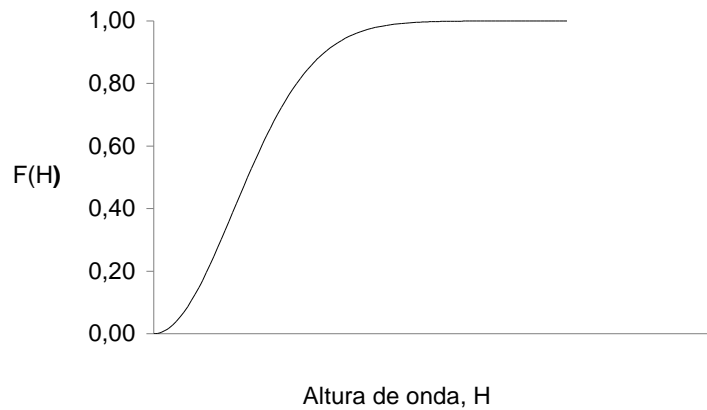


Fig.2.9 – Representação da função distribuição de probabilidade de Rayleigh.

A altura de onda com uma determinada probabilidade de ser excedida pode ser obtida pela seguinte equação:

$$P(X > H) = 1 - P(X < H) = 1 - F(H) = \exp\left(-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right) \quad (2.68)$$

O resultado da resolução da equação (2.68) em relação a H é dado pela seguinte expressão [5]:

$$H_{1/k} = \sqrt{\ln(k)} H_{rms} \quad (2.69)$$

em que k é o inverso da probabilidade de excedência.

Muitas vezes é também desejado conhecer-se a média do quantil superior $1/k$ das ondas, quando ordenadas por altura. Esse valor pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\bar{H}_{1/k} = \frac{\int_{H_{1/k}}^{+\infty} H f(H) dH}{\int_{H_{1/k}}^{+\infty} f(H) dH} = k \int_{H_{1/k}}^{+\infty} H f(H) dH \quad (2.70)$$

cujas resoluções não são simples e, por isso, se apresentam alguns dos resultados mais habitualmente utilizados [5]:

$$\bar{H}_{1/3} = H_s = \sqrt{2} H_{rms} \quad (2.71)$$

$$\bar{H} = 0,63 \bar{H}_{1/3} \quad (2.72)$$

$$\bar{H}_{1/10} = 1,28 \bar{H}_{1/3} \quad (2.73)$$

$$\bar{H}_{1/100} = 1,68 \bar{H}_{1/3} \quad (2.74)$$

Na generalidade dos casos, os resultados teóricos obtidos a partir da distribuição de Rayleigh estão de acordo com os dados obtidos directamente a partir dos registos. Há, no entanto, um pormenor a ter em conta: esta distribuição adapta-se a registos obtidos em zonas em que se possa considerar que as ondas não são afectadas pelos fundos. Em águas profundas, verifica-se que os registos obtidos seguem claramente a distribuição de Rayleigh. Quando as ondas começam a ser afectadas pelos fundos, os registos de altura de onda começam a desviar-se daqueles que são previstos por esta lei. Nomeadamente em águas pouco profundas, verificam-se desvios que se devem ao facto de as ondas maiores quebrarem. Neste caso, esta distribuição tende a sobrestimar o número de ondas maiores.

2.3.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A análise no domínio da frequência procura descrever a forma da superfície livre recorrendo às Transformadas de Fourier. As Transformadas de Fourier permitem descrever uma determinada função pela sobreposição de um número infinito de sinusoidais do tipo:

$$A_i \sin(k_i x + \omega_i t + \kappa_i) \quad (2.75)$$

em que A_i , k_i , ω_i e κ_i são, respectivamente, a amplitude, o número de onda, a frequência angular e a constante de fase da componente sinusoidal i .

Se a Teoria Linear for válida, a sobreposição de ondas regulares é possível. Nesse caso pode dizer-se que se procura descrever um estado de agitação irregular pela sobreposição de vários estados de agitação regular. Nesta análise, em vez de se obter uma representação de altura de onda contra probabilidade de ocorrência, obtém-se uma representação da frequência da sinusoidal (onda regular) contra o seu peso na contribuição para o estado de agitação registado, ou seja, um espectro (a contribuição é função da amplitude da sinusoidal).

Considere-se uma função $g(x)$, que satisfaz a seguinte condição: é absolutamente integrável no eixo dos xx e contínua por troços em todo o intervalo finito. Então a função $g(x)$ pode ser escrita da seguinte forma:

$$g(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{-i\omega x} dx e^{i\omega x} d\omega \quad (2.76)$$

representação que pode ser dividida da seguinte forma:

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{-i\omega x} dx \quad (2.77)$$

$$g(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) e^{i\omega x} d\omega \quad (2.78)$$

Substituindo a frequência angular, ω , por frequência hertziana, f ($f = 2\pi/\omega$), obtém-se:

$$g(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{-i2\pi f x} dx \quad (2.79)$$

$$g(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(f) e^{i2\pi f x} df \quad (2.80)$$

Se se tiver em conta o seguinte resultado:

$$e^{iz} = \cos(z) + i \sin(z) \quad (2.81)$$

torna-se evidente a representação de uma função recorrendo à soma de sinusoidais.

Os pares de expressões (2.77), (2.78) e (2.79), (2.80) são designados por Pares de Transformadas de Fourier. A análise dos pares mostra que se pode partir de uma função dependente, por exemplo, do tempo e obter uma descrição da mesma, mas dependente da frequência das sinusoidais. Se a função $g(x)$ for substituída por $\eta(t)$, elevação da superfície livre em função do tempo, fica demonstrado que a partir dos registos de elevação da superfície livre, se pode decompor a mesma em vários estados de agitação regular sobrepostos.

Na sua forma de representação mais simples, a contribuição de cada frequência para o estado de agitação é dada pela sua amplitude. O resultado da análise é um espectro de frequência da sinusoidal contra a amplitude da mesma, figura 2.10. No entanto, este espectro não tem grande utilidade prática, uma vez que nenhum estudo depende directamente da amplitude das sinusoidais. Considere-se, em alternativa, a expressão que permite calcular a energia específica de uma onda:

$$\bar{E} = \frac{\gamma H^2}{8} = \frac{\gamma A^2}{2} \quad (2.82)$$

Verifica-se que a energia é proporcional a $A^2/2$. Se, no espectro, se utilizar como ordenada $A^2/2$, em vez de A , obtém-se informação mais útil da sua leitura directa, uma vez que se fica com uma ideia da energia associada a cada frequência.

Os registos de elevação da superfície livre não são, em regra, contínuos, sendo obtidos por amostragem discreta, de pontos, com um determinado intervalo de tempo. Assim, o resultado das transformadas de Fourier é um conjunto discreto finito de frequências. Cada frequência é representativa de um determinado intervalo, ficando-lhe associada toda a energia desse intervalo. Como resultado, obtém-se um espectro discreto, chamado espectro de energia, figura 2.10. Esta representação não só não é muito prática, preferindo-se utilizar espectros contínuos, como também não corresponde à condição inicial das transformadas de Fourier, de ser infinito o número de frequências.

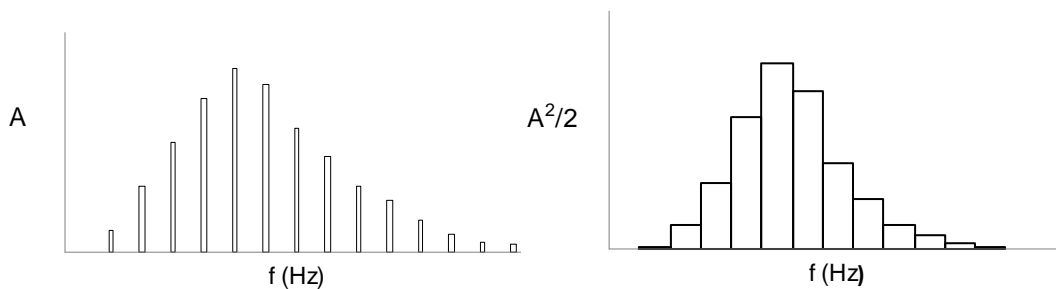


Fig.2.10 – Espectro discreto de altura de onda (à esquerda) e espectro por classes de $A^2/2$ (à direita).

Para se obter um espectro contínuo usam-se ferramentas estatísticas que permitem a suavização do espectro discreto num contínuo. O que se pretende obter é a densidade de energia, isto é, o valor da energia de cada classe de frequências quando a respectiva dimensão tende para zero, figura 2.11. Em linguagem matemática traduz-se pela seguinte expressão:

$$\lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{1}{2} A^2}{\Delta f} \right) \quad (2.83)$$

O espectro contínuo obtido designa-se por espectro de densidade de energia, $S(f)$,

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{1}{2} A^2}{\Delta f} \right) \quad (2.84)$$

e está mais próximo da condição inicial das transformadas de Fourier, de representarem uma determinada função por um número infinito de sinusoidais. Na realidade, na expressão (2.84), $S(f)$ não representa a densidade de energia, mas a densidade de variância, como se verá de seguida. Para que $S(f)$ representasse a densidade de energia, teria que ser obtido pela seguinte expressão:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{1}{2} A^2}{\Delta f} \gamma \right) \quad (2.85)$$

mas como γ é uma constante, é omitida na representação, utilizando-se as designações de espectro de densidade de variância ou de densidade de energia como sendo equivalentes.

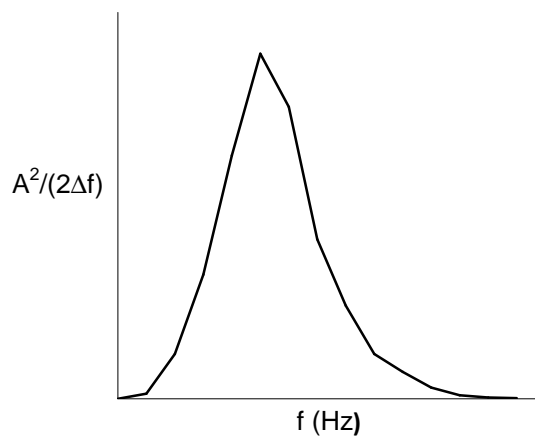


Fig.2.11 – Espectro contínuo.

Considere-se agora uma determinada onda sinusoidal i , individualizada do espectro. A variância da elevação da superfície livre gerada por essa sinusoidal é obtida por:

$$\sigma_i^2(\eta_i(t)) = \overline{\eta_i(t)^2} - \overline{\eta_i(t)}^2 \quad (2.86)$$

Tratando-se de uma sinusoidal, o valor de $\overline{\eta_i(t)}$ é zero, logo,

$$\sigma_i^2(\eta_i(t)) = \overline{\eta_i(t)^2} = \frac{1}{T} \int_0^T A_i^2 \sin^2(2\pi f_i t) dt = \frac{A_i^2}{2} \quad (2.87)$$

Isto é, a variância de uma componente de ordem i , individualizada, é igual a $A_i^2/2$. O espectro contínuo obtido anteriormente tem como ordenada o valor $A^2/(2\Delta f)$. Quando Δf tende para zero, este valor tende para a densidade de variância e indica a contribuição de cada componente para a variância global da elevação da superfície livre. Por isto, tal como referido anteriormente, a função $S(f)$ toma também (e mais adequadamente) o nome de espectro de variância. O integral deste espectro, ou seja, área subtensa pela sua curva, é a variância global da elevação da superfície e é proporcional à energia específica total do estado de agitação. Para se obter a energia específica total basta multiplicar o valor da área subtensa (o integral) por γ .

Note-se que se partiu de sinusoidais com três parâmetros (amplitude, frequência e fase) e se obteve uma representação com apenas dois: frequência e amplitude. Isto acontece porque a fase não é determinante para a caracterização de um estado de agitação em termos de energia e porque o processo é aleatório. A fase só teria interesse se se pretendesse reconstruir exactamente o registo inicial da superfície livre, o que raramente tem interesse.

O momento de ordem n do espectro é dado por:

$$m_n = \int_{-\infty}^{+\infty} f^n S(f) df \quad (2.88)$$

O momento de ordem zero, m_0 , é a área subtensa pelo espectro e, portanto, a energia específica total do estado de agitação é dada por:

$$\overline{E} = \gamma m_0 \quad (2.89)$$

Através de relações com resultados da análise no domínio do tempo, é possível demonstrar que [5]:

$$H_{rms}^2 = 8 m_0 \quad (2.90)$$

Substituindo o resultado da expressão (2.90), nas expressões (2.69), (2.71), (2.72), (2.73) e (2.74) obtém-se [5]:

$$H_{1/k} = 2\sqrt{2\ln(k)m_0} \quad (2.91)$$

$$\bar{H} = 2,5\sqrt{m_0} \quad (2.92)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.93)$$

$$\bar{H}_{1/10} = 5,1\sqrt{m_0} \quad (2.94)$$

$$\bar{H}_{1/100} = 6,65\sqrt{m_0} \quad (2.95)$$

O parâmetro H_s obtido a partir de m_0 não é a altura de onda significativa, pois não foi obtida directamente a partir dos registos de altura de onda. É apenas uma estimativa que, na maior parte das situações, se pode considerar aceitável.

Quanto maior for o domínio de frequências de um espectro, maior será a sua largura de banda. Uma medida de largura de banda de um espectro pode ser dada por ε , parâmetro de largura de banda espectral, que pode ser calculado por uma das seguintes expressões ([2], [6]):

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (2.96)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{N_z}{N_c}\right)}, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (2.97)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{T}_c}{\bar{T}_z}\right)}, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (2.98)$$

Por depender de m_2 e de m_4 , a primeira definição deve ser evitada sempre que possível, porque as técnicas de registo e digitalização não permitem grande confiança nas componentes de frequências mais elevadas e estes momentos são bastante dependentes dessas componentes.

Quanto mais próximo de um for ε , maior será a largura de banda do espectro (banda larga) e quanto mais próximo de zero, menor será a largura de banda do espectro (banda estreita). Um espectro com ε igual a zero corresponde a um estado de agitação regular (existe apenas uma frequência).

2.3.5. ANÁLISE DE PERÍODOS

Tal como para a elevação da superfície livre e para a altura, também foram desenvolvidas distribuições para descrever o período da onda.

Em 1962, Longuet-Higgins propôs a seguinte função densidade de probabilidade para descrever os períodos das ondas em agitação irregular [2]:

$$f(\tau) = \frac{1}{2(1 + \tau^2)^{3/2}} \quad (2.99)$$

em que:

$$\tau = \frac{T - T_{0,1}}{vT_{0,1}} \quad (2.100)$$

Os parâmetros m_0 , m_1 e m_2 são os momentos espectrais definidos anteriormente. v , é o parâmetro de largura espectral (não confundir com parâmetro de largura de banda espectral, ε) e é obtido através da seguinte expressão:

$$v = \frac{m_0 m_2 - m_1^2}{m_1^2} \quad (2.101)$$

$T_{0,1}$ é o valor do período médio previsto pela distribuição e pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$T_{0,1} = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.102)$$

Os valores característicos dos períodos podem ser obtidos a partir da seguinte expressão:

$$T_{m\acute{a}x} \approx T_{1/3} = \psi \bar{T} \quad (2.103)$$

em que ψ é uma constante que, segundo [2], varia entre 1,1 e 1,3.

Posteriormente, em 1969, Bretschneider propôs outra distribuição [2]:

$$f(T) = 2,7 \frac{T^3}{\bar{T}} \exp(-0,675 \tau^4) \quad (2.104)$$

em que:

$$\tau = \frac{T}{\bar{T}} \quad (2.105)$$

e \bar{T} é o período médio do registo. As duas distribuições apresentadas foram desenvolvidas com base no pressuposto de que o quadrado do período segue a distribuição de Rayleigh.

Sabendo que os períodos das ondas e as suas alturas estão relacionados, Longuet-Higgins procurou desenvolver uma distribuição que tivesse em conta esse facto. Assim, em 1975, apresentou uma distribuição conjunta de período e altura de onda (posteriormente modificada em 1983) [2]:

$$f(H, T) = \frac{\pi f(v)}{4} \left(\frac{H_*}{T_*} \right)^2 \exp \left(- \frac{\pi H_*^2}{4} \left(1 + \frac{1 - \frac{\sqrt{1+v^2}}{T_*}}{v^2} \right) \right) \quad (2.106)$$

em que:

$$H_* = \frac{H}{\bar{H}} \quad (2.107)$$

$$T_* = \frac{T}{\bar{T}_z} \quad (2.108)$$

$$f(v) = \frac{2(1+v^2)}{v + \frac{v}{\sqrt{1+v^2}}} \quad (2.109)$$

\bar{T}_z é o período médio de zero ascendente e é obtido a partir do registo de agitação.

Rice, em 1944, propôs os seguintes resultados:

$$\bar{T}_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.110)$$

$$\bar{T}_c = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (2.111)$$

em que \bar{T}_c é o período entre cristas sucessivas, \bar{T}_z o período médio de zero ascendente e m_0 , m_1 , m_2 e m_4 são os momentos espectrais anteriormente definidos.

2.3.6. ESPECTROS EMPÍRICOS

2.3.6.1. Introdução

Como se referiu anteriormente, não existe nenhuma lei que consiga descrever adequadamente a variabilidade da superfície marinha. No entanto, a existência de grande número de registos de agitação levou alguns autores a apresentar expressões empíricas que, em determinadas circunstâncias, podem descrever, com alguma fiabilidade, o espectro de um estado de agitação

Estas expressões, ou espectros empíricos, dependem de parâmetros como a velocidade do vento, altura de onda significativa, período, etc.

Os espectros empíricos mais utilizados são o de Pierson-Moskowitz e o JONSWAP, que são tratados a seguir.

2.3.6.2. Espectro de Pierson-Moskowitz

O espectro de Pierson Moskowitz, figura 2.12, é dado pela seguinte expressão [7]:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-1,25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \quad (2.112)$$

em que α é a constante de Phillips, toma o valor de 0,0081 e f_p é a frequência de pico, em Hz, e é dada pela seguinte expressão:

$$f_p = \frac{0,14 g}{U_{19}} \quad (2.113)$$

em que U_{19} é a velocidade do vento dezanove metros e meio acima do nível do mar.

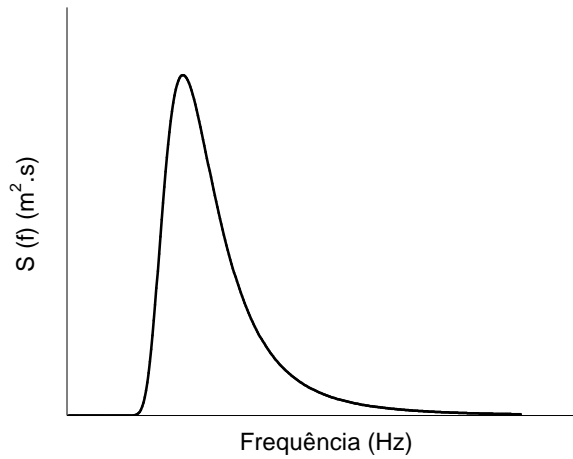


Fig.2.12 – Representação do espectro empírico de Pierson-Moskowitz.

Este espectro apenas pode ser aplicado a mar completamente desenvolvido e considera que o vento actua com duração infinita ao longo de um *fetch* com comprimento infinito. Na realidade isto significa que o espectro deve ser aplicado quando o vento actua durante longos períodos de tempo sobre grandes distâncias, sem alterações significativas nas suas características, como direcção ou velocidade.

2.3.6.3. Espectro JONSWAP

Ao contrário do anterior, este espectro empírico foi desenvolvido para ser aplicado em situações em que o *fetch* é limitado. O espectro JONSWAP, figura 2.13, é dado pela seguinte expressão [2]:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-1,25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \beta^{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{f-f_p}{\delta f_p}\right)^2\right)} \quad (2.114)$$

em que f_p é a frequência de pico, δ é um parâmetro que depende de f_p (δ é igual a 0,07 quando $f \leq f_p$ e é igual a 0,09 quando $f \geq f_p$), β é um parâmetro que varia entre 1 e 7, sendo geralmente utilizado o valor de 3,3 e α é a constante de Phillips que geralmente toma o valor de 0,0081, mas também pode ser calculada pela seguinte expressão [2]:

$$\alpha = 0,076 \left(\frac{g FE}{U_{10}^2} \right)^{-0,22} \quad (2.115)$$

em que FE é o comprimento do *fetch* e U_{10} a velocidade do vento dez metros acima do nível médio do mar. A frequência de pico, em Hz, pode ser obtida pela seguinte expressão ([2], [5]):

$$f_p = 3,5 \left(\frac{g^2 FE}{U_{10}^3} \right)^{-0,33} \quad (2.116)$$

em que as variáveis têm o mesmo significado que na expressão (2.115).

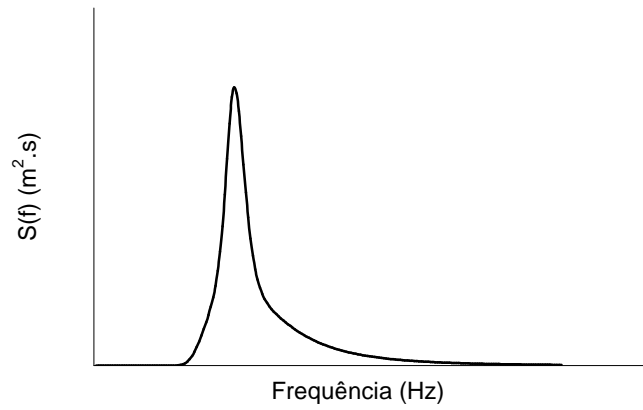


Fig.2.13 – Representação do espectro empírico JONSWAP.

3

OS DISPOSITIVOS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS E ANÁLISE COMPARATIVA DO SEU FUNCIONAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de conversão de energia das ondas em tido um desenvolvimento relevante nos últimos tempos, com o aparecimento de novas tecnologias. Este facto, deve-se à procura crescente da exploração desta fonte de energia.

Este estado de dinâmica crescente dificulta o estabelecimento de padrões e categorias que permitam agrupar e classificar de forma simples os dispositivos existentes. Basta consultar as diversas publicações existentes para perceber que certas classificações são completamente desprezadas, enquanto outras discordam quanto à forma como se classifica determinado dispositivo, ou qual deve ser a forma dominante para agrupar as diversas tecnologias.

Parece, contudo, haver algum consenso quanto ao número possível de critérios que podem ser usados para classificar um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas, isto é, apesar de não ser consensual quantas ou quais as sub-categorias, ou aquilo que cada uma abrange, parece que todas as classificações têm por base um dos três seguintes aspectos:

- Distância à linha de costa;
- Dimensão e/ou orientação do dispositivo;
- Modo geral de funcionamento.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

3.2.1. DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA

No que diz respeito à distância à linha de costa, a maior parte, senão mesmo a totalidade dos autores, considera as seguintes três sub-categorias, figura 3.1 ([8], [9], [10], [11], [12]):

- Fixos na costa (“*onshore*” ou “*shoreline*”): dispositivos instalados na linha de costa natural;
- Próximos da costa (“*nearshore*”): dispositivos localizados a uma pequena distância da costa, ou a uma distância situada entre o “*onshore*” e o “*offshore*”, da ordem das dezenas

ou centenas de metros. Nesta categoria também estão incluídos os dispositivos instalados em estruturas artificiais, como quebramares, molhes, etc.;

- Afastados da costa (“*offshore*”): dispositivos extremamente afastados da costa, a distâncias da ordem dos quilómetros, frequentemente para lá da linha do horizonte.

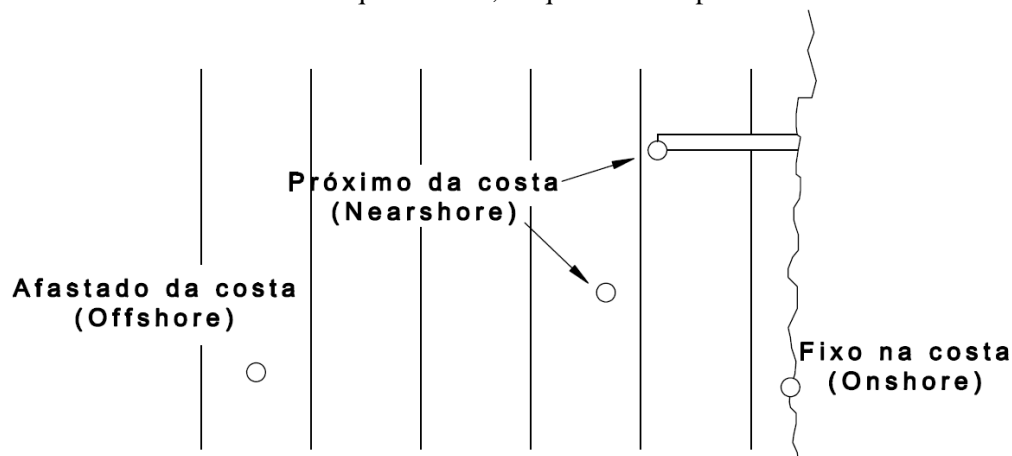


Fig.3.1 – Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa.

A razão para a existência destas classes prende-se com o nível energético da onda e a facilidade de instalação/acesso ao dispositivo. Devido ao atrito da onda com o fundo do mar, uma onda perde energia à medida que se vai aproximando da costa. Logo, quanto mais próximo da costa, menor o nível energético disponível. Para se ser mais correcto, os dispositivos deveriam, eventualmente, ser classificados em função da profundidade, pois é esta que determina a interacção entre a onda e o fundo do mar. No entanto, salvo raríssimas excepções, como a distância à linha costa e a profundidade estão relacionadas, considera-se apenas a primeira, não sendo cometido um erro significativo.

Por outro lado, compreende-se facilmente que quanto mais longe da costa, maiores serão os custos e dificuldades associados à instalação do dispositivo, à realização dos trabalhos no mar, maiores as distâncias, logo os custos de transporte, as dificuldades resultantes de trabalho em profundidade, etc.

Pode agora compreender-se a inclusão de dispositivos instalados em estruturas artificiais, como os molhes ou quebra-mares, na mesma categoria dos próximos da costa. Apesar de, aparentemente, a estrutura fazer parte da linha de costa, a realidade é que possibilita o acesso a maiores profundidades, logo maiores níveis energéticos, do que junto à costa natural.

3.2.2. DIMENSÃO E/OU ORIENTAÇÃO

Quanto à dimensão e/ou orientação parece também haver acordo, apesar de esta classificação ser muitas vezes desprezada. As possibilidades são, figura 3.2 [13]:

- *Point absorbers* (PA) (Absorvedores pontuais);
- *Attenuators* (Atenuadores);
- *Terminators* (Terminadores).

Point-absorber é um dispositivo com uma dimensão pequena quando comparada com o comprimento da onda para a qual foi projectado.

Attenuator e *terminator* são dispositivos com um comprimento mais ou menos da ordem de grandeza do comprimento da onda para a qual foram projectados, usando-se o termo “*attenuator*” quando a

maior dimensão está orientada perpendicularmente à frente de onda e “*terminator*” quando a maior dimensão está orientada paralelamente à frente.

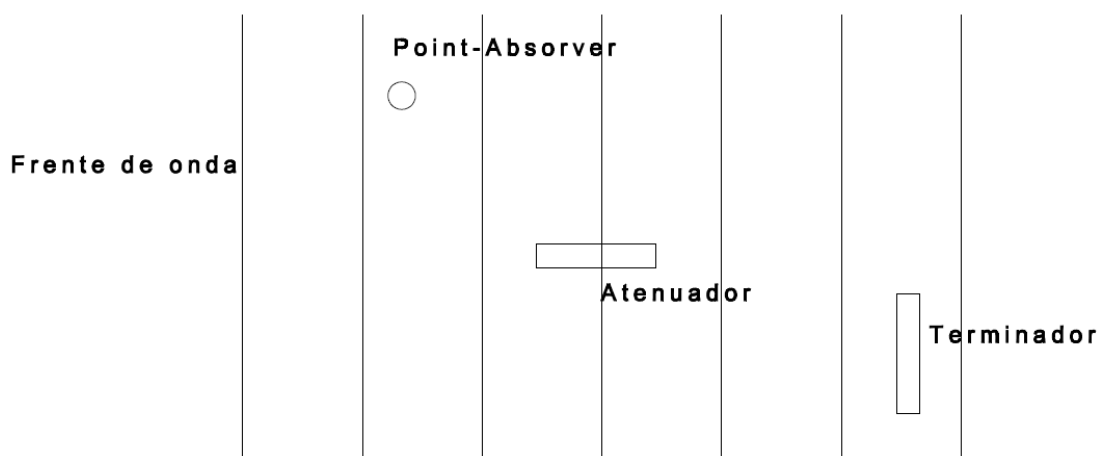


Fig.3.2 – Classificação de dispositivos quanto à dimensão e/ou orientação.

3.2.3. MODO DE FUNCIONAMENTO

Esta classificação é aquela em que se verifica um maior desacordo entre as diversas publicações, quer na classificação do dispositivo propriamente dito, quer nas diversas sub-classes a considerar.

Face a estes problemas, analisando a informação recolhida relativamente aos dispositivos existentes, é proposta uma sistematização própria, que procura descrever, o melhor possível, o estado corrente de desenvolvimento da tecnologia. Esta divisão corresponde a uma compilação das mais significativas recolhidas em diversas publicações.

São, então, propostas as seguintes classes, cuja descrição detalhada será efectuada mais adiante:

- Coluna de água oscilante (CAO);
- Placa articulada no fundo;
- Point absorbers (absorvedores pontuais);
- Dispositivos alongados;
- Por galgamento;
- Magneto-hidrodinâmico;
- Outros;
- Multi-point-absorbers.

Note-se a repetição da classe *Point absorber* (também existente na classificação relativa à dimensão e/ou orientação). De facto, estes dispositivos têm características muito particulares de funcionamento e, por isso, justifica-se a sua existência, quer como classe de dimensão e/ou orientação, quer como classe de funcionamento.

No decurso deste trabalho será esta a principal classificação utilizada para distinguir os dispositivos, quer porque o objectivo principal deste capítulo é uma descrição do seu funcionamento, quer porque as restantes classificações se estão a tornar incompletas, por desactualização.

Publicações anteriores, em épocas em que a tecnologia estava menos desenvolvida, preferiam a distância à costa como principal forma de caracterizar um dispositivo, uma vez que grande parte da

tecnologia tinha o seu funcionamento intimamente ligado a esta. No entanto, tem vindo a verificar-se que, por exemplo, dispositivos que antes apenas eram considerados costeiros, como a CAO, passaram a existir em *nearshore* e *offshore*, o que torna esta classificação, quando utilizada isoladamente, inadequada e, muitas vezes, confusa.

A classificação quanto à dimensão/orientação é, por si só, insuficiente, porque fornece muito pouca informação. Além disso, pode muitas vezes induzir em erro. Por exemplo, classificar um dispositivo de grande dimensão, na direcção paralela à face da onda, como terminador, pode levar alguém a pensar que este tem o seu funcionamento associado a essa dimensão. Este pode, no entanto, ter o seu funcionamento associado à menor dimensão, a perpendicular à face da onda, e desenvolver-se bastante na direcção paralela para poder recolher maiores quantidades de energia por onda.

No subcapítulo seguinte será efectuada uma descrição das várias categorias de dispositivos. Sempre que necessário, a descrição será seguida de um exemplo que ajude a clarificar o conceito exposto. Serão também, quando se justificar, descritos em pormenor alguns aspectos de vários exemplos desta tecnologia.

3.3. MODO DE FUNCIONAMENTO

3.3.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

Este sistema é constituído por três componentes principais: a câmara, a turbina e o gerador. A câmara, cheia de ar, está aberta na base e parcialmente submersa, de modo a não haver fugas de ar interior pela abertura. A turbina, que faz actuar o gerador, está, numa extremidade, ligada ao topo da câmara e, na outra extremidade, aberta para a atmosfera. Quando uma onda atinge as imediações da câmara, o nível de água sobe (devido ao efeito dos vasos comunicantes) e o ar no seu interior é comprimido, forçando a sua saída pela turbina. Quando o nível de água desce, forma-se uma depressão e o ar exterior é aspirado para a câmara, mais uma vez através da turbina. A circulação do ar pela turbina causa a sua actuação e, estando esta ligada ao gerador, produz electricidade, figura 3.3 ([8], [10], [12]).

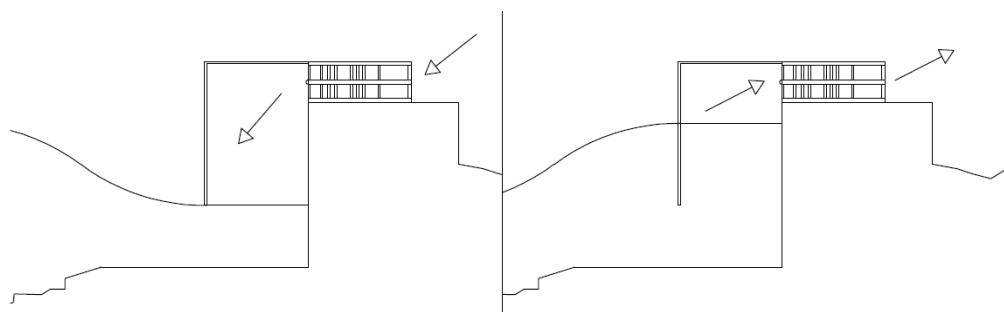


Fig.3.3 – Funcionamento de uma CAO.

Para aumentar o rendimento do sistema usam-se turbinas em que o sentido de rotação é independente do sentido do escoamento, sendo o modelo mais divulgado o da turbina Wells [12]. No entanto, variados problemas na utilização deste tipo de turbina, estão a levar ao desenvolvimento de novos modelos, como a turbina de impulso e a turbina radial (para mais informações acerca das turbinas deve consultar-se bibliografia da especialidade, uma vez que o desenvolvimento do tema sai do âmbito deste trabalho).

Este dispositivo pode estar rigidamente fixado ou ser flutuante, ficando ancorado, estar na costa, em estruturas de defesa, ou similares, ou ser mesmo instalado *offshore*.

Na tabela 3.1 apresentam-se alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

Tabela 3.1 – Dispositivos CAO mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
MightyWhale	JAMSTEC
Oceanlinx	Oceanlinx
Central do Pico, Açores	IST, INETI, EFACEC S.A., Profabril, EDP, EDA, Queen's University of Belfast (UK) e University College Cork (Irlanda)
Central de Limpet	Wavegen
P.S.P.	Float inc.
Ocean Energy Buoy	Ocean Energy Buoy Ltd
MRC 1000	ORECon Ltd
Sperboy	Embley Energy
Tunnelled Wave Energy Converter	Sewave Ltd
Kvaerner	Kvaerner Brugs AS
ConWEC	Norwegian University for Science and Technology
Vizhinjam	-

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

ConWEC

Na realidade este sistema não funciona como a CAO típica: um flutuador que repousa na superfície do mar move-se verticalmente sob a acção das ondas, fazendo actuar uma bomba. A bomba por sua vez aspira e bomba água do mar para um reservatório elevado que alimenta um grupo turbina-gerador eléctrico ([14], [15]). A inclusão deste sistema como CAO deve-se ao facto de o seu desenvolvimento ter sido originado a partir do conceito da CAO típica, mas em que o ar da câmara de ar era substituído por um flutuador [14].

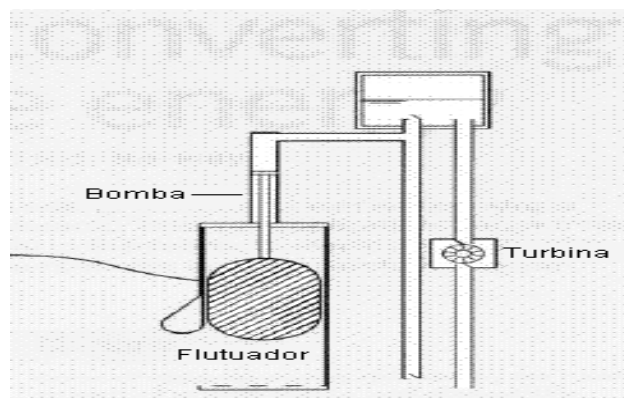


Fig.3.4 – Esquema do dispositivo conWEC (retirado de [15]).

PSP

O sistema PSP consiste numa plataforma flutuante celular, em que as células, cheias de ar, têm o fundo aberto para o mar. A passagem da onda pela estrutura cria sobrepressões nas zonas de crista e depressões nas zonas de cava. A diferença de pressão entre as células adjacentes é usada para criar a circulação de ar entre elas, circulação essa que, numa turbina, produz electricidade [16]. A principal diferença entre este sistema e a CAO típica está no facto de a turbina estar ligada a duas câmaras de pressões diferentes e variáveis, em vez de estar ligada a uma câmara de pressão variável e à atmosfera.

MRC 1000

O MRC 1000 é um dispositivo do tipo CAO flutuante para instalação em *offshore*. A particularidade deste dispositivo é o facto de possuir múltiplas câmaras de ar. Cada câmara tem uma frequência de ressonância distinta, o que permite ao aparelho operar com bons rendimentos sob condições variadas [10]. O MRC 1000 apresenta, neste aspecto, uma vantagem relativamente à CAO tradicional.

Estes dispositivo deverá ficar instalado a profundidades maiores que 50 m e poderá gerar uma potência próxima de 1 MW.

Kvaerner OWC, Vizhinjam OWC e Sperboy

Estes sistemas, ao contrário do MRC 1000, em vez de terem múltiplas câmaras, apresentam uma única câmara, mas com várias frequências de ressonância, de modo a também conseguirem funcionar eficazmente com diferentes condições de agitação ([14], [17]).

3.3.2. PLACA ARTICULADA NO FUNDO

Este sistema é constituído por uma placa, total ou parcialmente submersa, vertical quando em repouso, que roda em torno de um eixo horizontal existente na sua base, figura 3.5.

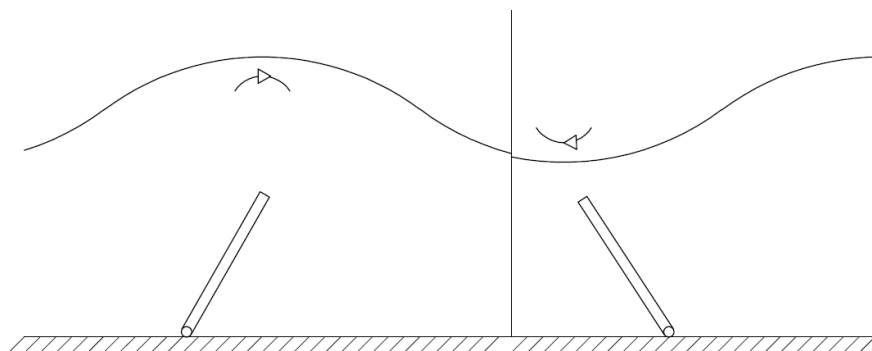


Fig.3.5 – Funcionamento de um dispositivo de placa articulada no fundo.

A placa está orientada paralelamente à frente de onda e está assente no fundo do mar. A passagem de uma onda pelo dispositivo cria um campo de velocidades na sua envoltória que causa a sua rotação [18]. Como este dispositivo tira sobretudo partido da componente horizontal da velocidade, é vantajosa a sua instalação em águas pouco profundas, logo a pequenas distâncias à costa. Nesta região, as órbitas das partículas excitadas pela onda tendem a achatar-se e a ficar elípticas e, portanto, com componente horizontal dominante. A rotação da placa faz actuar sistemas de produção de energia,

accionando geralmente mecanismos hidráulicos que bombeiam água do mar sob pressão para turbinas (quer em terra, quer nas imediações do dispositivo), que accionam o gerador eléctrico. Há também sistemas que bombeiam óleo num circuito fechado, em vez de água do mar.

Na tabela 3.2 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

Tabela 3.2 – Dispositivos de placa articulada no fundo mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
Oyster	Aqua Marine Power Ltd
bioWAVE	Biopower Systems Ltd
WRASPA	Lancaster University Renewable Energy Group
WaverRoller	AW-Energy Oy
FronD	The Engineering Business Ltd

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

bioWAVE

Este sistema, em vez de ser constituído por placas de grandes dimensões, é constituído por traves verticais flexíveis, que se estendem a toda a altura, desde a base até à superfície da água, figura 3.6. O princípio de funcionamento é o mesmo dos restantes, com a diferença de as traves não oscilarem em fase, mas sim num movimento semelhante ao de longas algas, fenómeno que, aliás, inspirou o mecanismo [19]. A rotação das traves faz actuar directamente o gerador, na base, em vez de excitar algum fluido sob pressão que faria actuar um gerador ou uma turbina distante.



Fig.3.6 – Antevisão do sistema bioWAVE (retirado de [19]).

3.3.3. POINT ABSORBERS

3.3.3.1. Introdução

Segundo [20], a principal característica de um PA é “recolher mais energia do que a disponível ao longo da largura do dispositivo, se o dispositivo estiver afinado (isto é, se a sua frequência de vibração natural for igual à da onda incidente)”. Efectivamente, devido à variabilidade de tecnologias existentes

nesta categoria, a dimensão em planta acaba por ser o principal método para classificar um dispositivo como sendo PA. Frequentemente este critério é insuficiente e pode levar a que haja conflitos entre as diferentes categorias. Acrescentam-se, portanto, algumas características que parecem ser consensualmente aceites como pertencendo aos PA e que permitem distingui-los de outros que, eventualmente, só pela sua dimensão, seriam incluídos nesta classe:

- parecem ser aproximadamente equidimensionais em planta, isto é não se apresentam muito mais desenvolvidos numa direcção do que nas outras;
- os PA tiram partido da variação de pressão ou de deslocamentos (horizontais e/ou verticais) que a onda induz na sua passagem, quer na totalidade do dispositivo, quer em parte, isto é, não recolhem energia com deformações, movimentação de ar, galgamento, mas sim com alguma forma de deslocamento.

Dependendo da tecnologia envolvida na recolha de energia, podem estar sobre a superfície livre, semi-submersos, completamente submersos, rigidamente fixados ao fundo ou ancorados.

Com as características descritas, alguns dispositivos anteriormente referidos como PA ficarão de fora desta categoria. Parece, contudo, que a definição de um PA está a tender para a apresentada e que os dispositivos que ficarão excluídos, devido aos estudos e desenvolvimentos em curso, estão a assumir-se como uma categoria própria, como por exemplo, os dispositivos de placa articulada no fundo.

Os PA são os dispositivos que apresentam maior variabilidade nas soluções propostas, o que dificulta uma descrição generalizada do seu funcionamento. Contudo, muitas vezes, esta variabilidade resume-se a pequenos pormenores e não ao princípio de funcionamento geral. Assim sendo, as diferentes tecnologias existentes para PA foram agrupadas segundo características mais ou menos semelhantes, que serão descritas de uma forma geral, apresentando-se, sempre que necessário, exemplos mais detalhados.

3.3.3.2. Oscilação de massas

Estes dispositivos flutuam na superfície livre, presos por cabos. Os movimentos da ondulação sob o dispositivo (vertical, horizontal, inclinado, etc.), provocam a oscilação de determinadas massas relativamente ao restante dispositivo, figura 3.7. O movimento destas massas (de forma linear, pendular, rotacional, etc.) é aproveitado para produção de energia eléctrica.

Na tabela 3.3 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

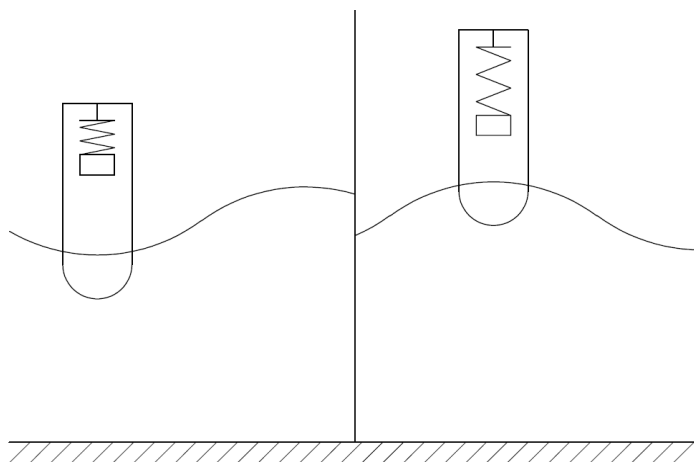


Fig.3.7 – Esquema geral do funcionamento de um sistema de oscilação de massas.

Tabela 3.3 – Dispositivos PA de oscilação de massas mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
PowerBouy	Ocean Power Technologies
PS Frog	Lancaster University Renewable Energy Group
SEAREV	Ecole Central de Nantes
FWEPS	Applied Technologies Company Ltd
Brandl Generator	Brandl Motor
SyncWave Power Resonator	SyncWave Energy Inc

3.3.3.3. Sistemas de bombagem de água

Estes sistemas utilizam flutuadores que se movem sob a acção das ondas, accionando bombas. As bombas fazem circular água do mar sob pressão, que acciona turbinas que produzem electricidade, figura 3.8. A turbina pode fazer parte do próprio dispositivo, ou existir numa central em terra, caso em que é necessário uma canalização adequada entre o dispositivo e a central.

Na tabela 3.4 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

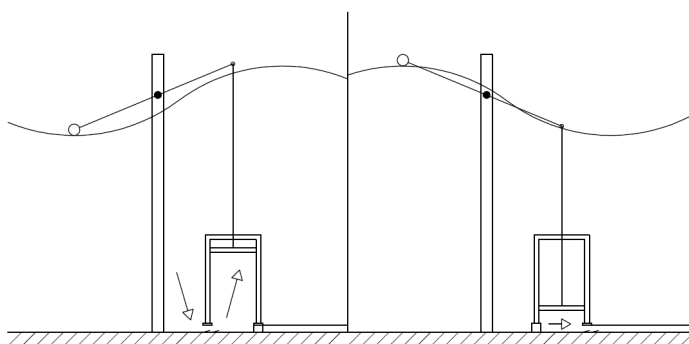


Fig.3.8 – Esquema geral do funcionamento de um sistema de bombagem de água.

Tabela 3.4 – Dispositivos PA de bombagem de água mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
CETO	Seapower Pacific Pty Ltd
Waveberg	Waveberg Development Ltd
DWP Float Pump	Danish Wave Power
OMI Ces	Ocean Motion International , LLC
FreeFlow 69 Wave Pump	FreeFlow 69
Burin Wavepower Pump	College of the North Atlantic
AquaBouy	Finivera Renewables
Seadog Pump	Independent Natural Resources Inc.

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

AquaBuoy

O sistema AquaBuoy, figura 3.9, é composto por quatro componentes principais: o flutuador, o tubo de aceleração, as mangueiras-bomba e o disco-pistão. O flutuador localiza-se à superfície, ligado no fundo ao tubo de aceleração, vertical, cheio de água e aberto nas duas extremidades. No interior do tubo estão duas mangueiras-bomba e o disco-pistão: uma mangueira fixada à parte superior do tubo de aceleração, estendendo-se até meio comprimento deste tubo, onde termina no disco-pistão. A outra mangueira, está suspensa do disco-pistão, estendendo-se até à extremidade inferior do tubo, onde é fixada [21].

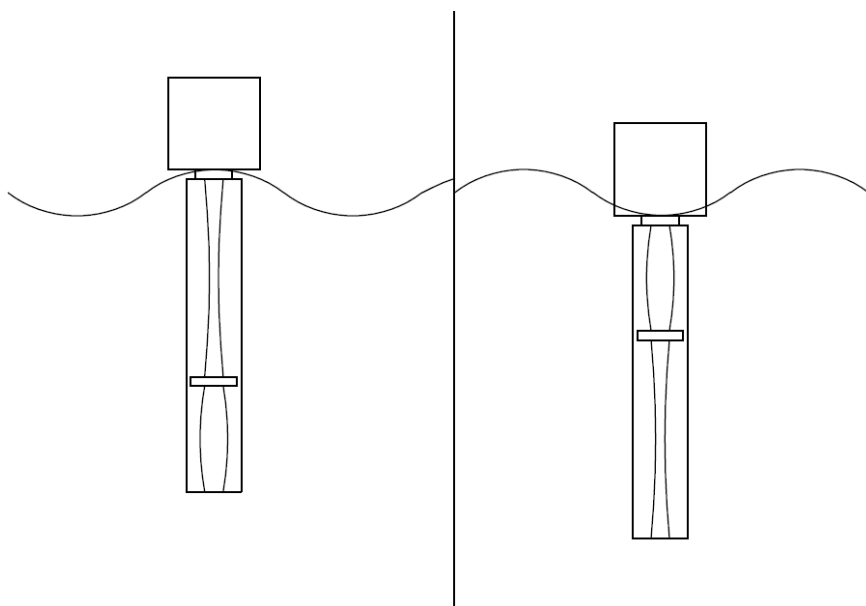


Fig.3.9 – Esquema do dispositivo AquaBuoy.

Quando o flutuador se move sob acção das ondas, movimentava verticalmente o tubo de aceleração que, por ser aberto, tenderia a mover-se relativamente ao volume de água no seu interior. No entanto, o disco-pistão, devido à sua área, oferece resistência ao movimento relativo da água. Como consequência, no caso de um movimento ascendente, a mangueira superior é esticada e a inferior encurtada (o contrário acontece no caso de movimento descendente). Estando as mangueiras preparadas para reduzir o seu volume quando esticadas e aumentar quando encurtadas, verifica-se a sucção de água do mar quando a mangueira é encurtada e o bombeamento quando a mangueira é esticada ([21], [22]). A água bombada é usada para accionar um grupo turbina-gerador, produzindo assim electricidade.

Este dispositivo está projectado para profundidades perto dos 50 m e poderá produzir uma potência de cerca de 56 kW.

Devido às suas características, este dispositivo, também poderia estar no grupo apresentado em 3.3.3.5. No entanto, como tem a particularidade de bombear água, optou-se por se fazer a sua apresentação no presente ponto.

3.3.3.4. Sistemas de roldanas

Estes dispositivos utilizam um flutuador pesado, ligado por um cabo a um contra-peso. O cabo é suspenso de uma roldana, fixa (de formas mais ou menos complexas) a um eixo, geralmente horizontal, figura 3.10. O movimento do flutuador sob acção das ondas (e consequentemente do contra peso), faz girar a roldana; a roldana faz girar o eixo e este, por sua vez, acciona o sistema de produção de energia. Estes sistemas, devido à sua natureza, são emersos, suportados por estruturas rigidamente fixadas ao fundo do mar.

Na tabela 3.5 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

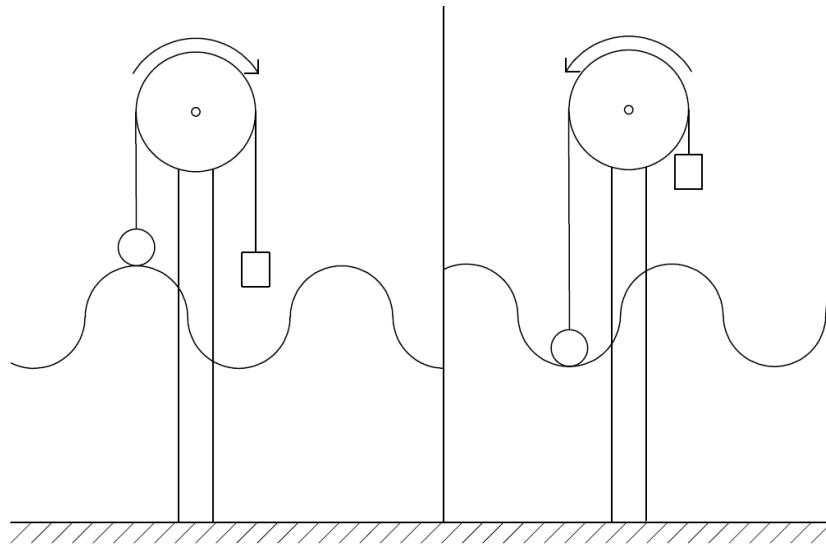


Fig.3.10 – Esquema do funcionamento de um sistema de roldanas.

Tabela 3.5 – Dispositivos PA de roldana mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
EGWaP	Able Technologies LLC
TWPEG	Raj Balkee

3.3.3.5. Deslocamentos relativos

Estes sistemas são constituídos por um flutuador, emerso ou submerso, com grande liberdade de movimento e por uma componente com reduzida ou nula liberdade de movimento (estrutura rigidamente fixada ao fundo do mar, emersa ou submersa; corpo flutuante ancorado sem liberdade de movimento, emerso ou submerso; corpo com liberdade de, mas elevada resistência ao, movimento), figura 3.11. A passagem da onda pelo dispositivo causa o deslocamento relativo entre o corpo com grande liberdade e o fixo, sendo este deslocamento aproveitado para produzir energia (geralmente através de geradores eléctricos lineares ou sistemas hidráulicos que fazem actuar um motor que, por sua vez, acciona um gerador eléctrico).

O que distingue este sistema dos de bombagem é o facto de a energia ser obtida directamente sob a forma eléctrica, sem bombagem intercalar.

Na tabela 3.6 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

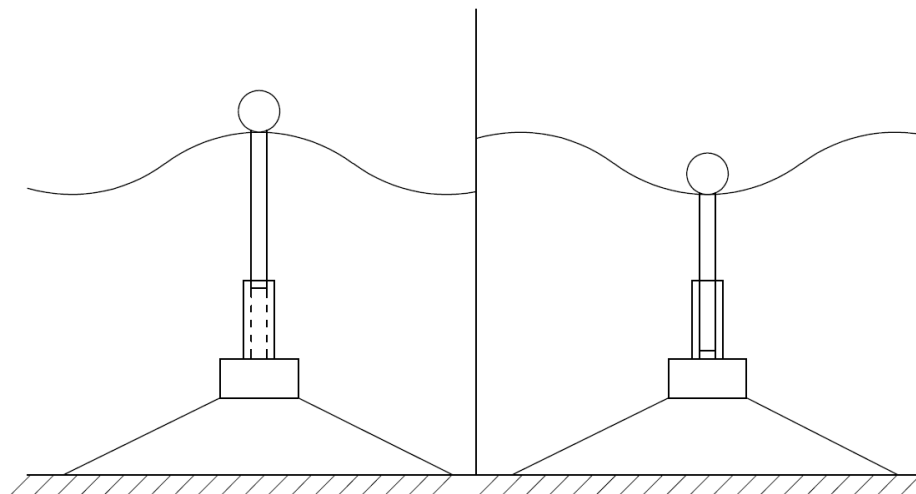


Fig.3.11 – Esquema do funcionamento de um sistema de deslocamentos relativos.

Tabela 3.6 – Dispositivos PA de deslocamentos relativos mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
A.W.S.	AWS Ocean Energy Limited
Dispositivo sem nome	Ing Arvid Nesheim
Trident Converter	Trident Energy Limited
Danish Point Absorber	-
Seabase WEC	Seabased AB
OWEC	Ocean Wave Energy Company
Aegir Dynamo	Ocean Navitas
Permanent Magnet Linear Generator Buoy	Oregon State University
Permanent Magnet Rack and Pinion Generator Buoy	
Contactless Direct Drive Generator Buoy	
Sloped IPS Buoy	Wave Power Group, The University of Edinburgh
Wavebob	Wavebob

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

Sloped IPS Buoy

O Sloped IPS Buoy, desenvolvido pela Universidade de Edimburgo, tem um funcionamento semelhante ao sistema AquaBuoy, com a diferença fundamental de ser inclinado em vez de vertical. Este dispositivo é uma estrutura planar, isto é, com uma dimensão substancialmente mais pequena do que as outras duas, semi-submersa, instalada com uma dada inclinação relativamente à horizontal,

oferecendo, desta forma, grande resistência a movimentos puramente verticais ou horizontais, figura 3.12. Os grandes deslocamentos apenas são permitidos na direcção correspondente ao seu plano inclinado. No interior da estrutura existem dois tubos, paralelos, com a mesma inclinação que esta, que a atravessam a todo o comprimento. Os dois tubos estão abertos para o mar nas duas extremidades, estando, portanto, cheios de água. No interior de cada tubo existe um pistão ligado a sistemas hidráulicos. Quando uma onda passa pelo dispositivo e causa o seu movimento ao longo do seu plano, por causa dos tubos serem abertos para o mar, o dispositivo tenderia a deslocar-se relativamente ao volume de água no seu interior (que permaneceria relativamente imóvel). No entanto, os pistões oferecem resistência a este movimento relativo, fazendo actuar os sistemas hidráulicos que bombeiam óleo para um motor que, por sua vez, faz actuar um gerador eléctrico ([11], [23]).

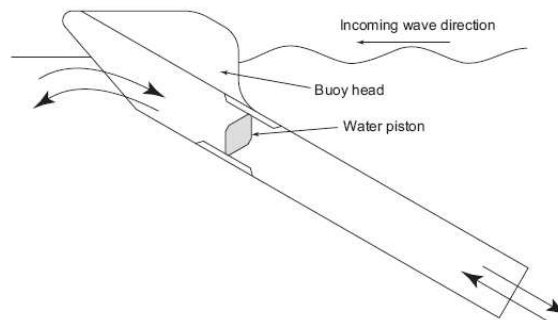


Fig.3.12 – Esquema do funcionamento do sistema Sloped IPS Buoy (retirado de [24]).

A.W.S.

O A.W.S. é um PA que funciona em profundidades entre os 40 e os 100 m. Este sistema é basicamente constituído por dois cilindros ociosos verticais: um interior, rigidamente fixado ao fundo do mar e um exterior que se desloca verticalmente ao longo do interior, figura 3.13. Dentro dos cilindros existe ar com uma pressão que equilibra a pressão da coluna de água que lhes está sobrejacente em condições estáticas, mantendo os cilindros numa posição neutra. Quando uma onda passa sobre o dispositivo, a crista provoca o aumento da pressão sobre os cilindros. Para equilibrar este aumento de pressão, o cilindro exterior desce, comprimindo o ar interior. A cava, por sua vez, reduz a pressão em relação ao nível neutro, causando a expansão do ar interior e a subida do cilindro ([9], [10], [12], [25]). O movimento relativo entre os dois cilindros acciona sistemas hidráulicos que, por sua vez, accionam um grupo motor-gerador eléctrico.

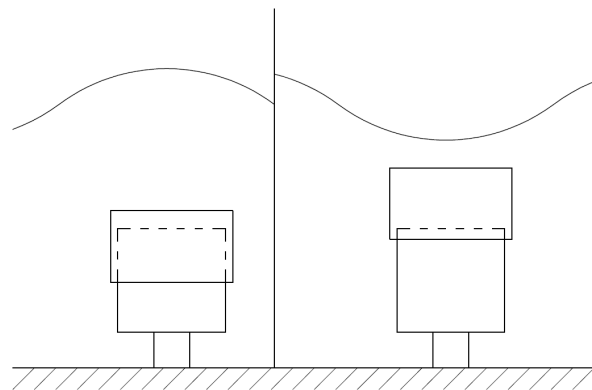


Fig.3.13 – Esquema do funcionamento do sistema A.W.S.

3.3.4. DISPOSITIVO ALONGADOS

Os dispositivos alongados têm a maior dimensão da mesma ordem de grandeza que o comprimento da onda incidente, estando orientados perpendicularmente à frente de onda. O seu funcionamento está associado à passagem da onda ao longo de todo o seu comprimento. Quando uma onda atinge o dispositivo, devido à sua (elevada) dimensão, este fica sujeito a diferentes acções ao longo do seu desenvolvimento, conforme cada secção esteja sob acção de uma crista ou de uma cava, figura 3.14. É este gradiente de acções entre as várias secções do dispositivo que é usado para recolher energia, por exemplo, provocando deslocamentos diferenciais ao longo do sistema, que fazem actuar os geradores eléctricos.

Na tabela 3.7 estão apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

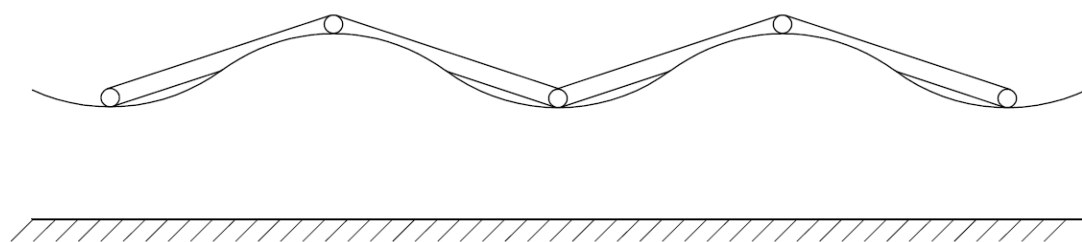


Fig.3.14 – Esquema do funcionamento de um dispositivo alongado.

Tabela 3.7 – Dispositivos alongados mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
Pelamis Wave Energy Converter	Pelamis Wave Power Ltd
Dexa Wave Energy Converter	DEXA Wave UK
The Floating Wave Generator	G. Edward Cook
Wave Treader	Green Ocean Energy Ltd
McCabe Wave Pump	Hydam Technologies Ltd
C-Wave System	C-Wave Ltd
Anaconda	Maritime Energy Development Limited
WaveBlanket	Wind, Waves and Sun
WaveMaster	Ocean WaveMaster Limited
Naturalist Wave Power Plant	Dalga Enerjisi

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

Pelamis

O Pelamis é um sistema articulado semi-submerso, localizado em *offshore*, composto por segmentos cilíndricos ligados entre si por rótulas, semelhante ao esquema apresentado na figura 3.14. A passagem da onda ao longo do dispositivo eleva ou rebaixa as rótulas, conforme se trate da crista ou

da cava, causando a rotação relativa entre segmentos adjacentes, quando estes se adaptam às inclinações das diferentes faces da onda. A rotação das rótulas faz actuar sistemas hidráulicos que accionam os geradores existentes em cada segmento ([9], [10], [12], [26]).

Wave Blanket

O Wave Blanket é um dispositivo celular, flexível, semelhante a uma manta (daí o nome Blanket), que repousa na superfície livre da água. A passagem das ondas sob a membrana provoca a sua deformação por flexão, de modo a adaptar-se à curvatura da onda, figura 3.15. Como consequência, tendo em conta a geometria das deformações que ocorrem em flexão, conforme a sua posição em relação ao eixo neutro, parte das células expande-se, reduzindo a sua pressão interior, e parte das células contrai-se, aumentando a sua pressão interior. A diferença entre a pressão das células é usada para criar um escoamento de ar entre elas que, passando por uma turbina existente no dispositivo, produz energia.

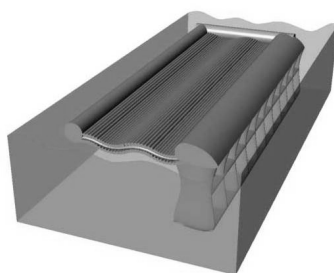


Fig.3.15 – Antevsão do dispositivo Wave Blanket (retirado de [27]).

WaveMaster

O WaveMaster é um dispositivo localizado em *offshore*, flutuante, que fica completamente submerso a pouca profundidade. É formado por duas câmaras (uma de alta pressão e outra de baixa pressão) cheias de água, que se dispõem paralelamente entre si e perpendicularmente à frente de onda. As câmaras estão ligadas por turbinas que permitem a passagem de água das câmaras de alta para as câmaras de baixa pressão, figura 3.16. A superfície superior das câmaras é coberta por válvulas de retenção: sobre a câmara de alta pressão apenas permitem a entrada de água (quando a pressão exterior é superior à interior) e sobre a câmara de baixa pressão apenas permitem a saída de água (quando a pressão exterior é inferior à interior).

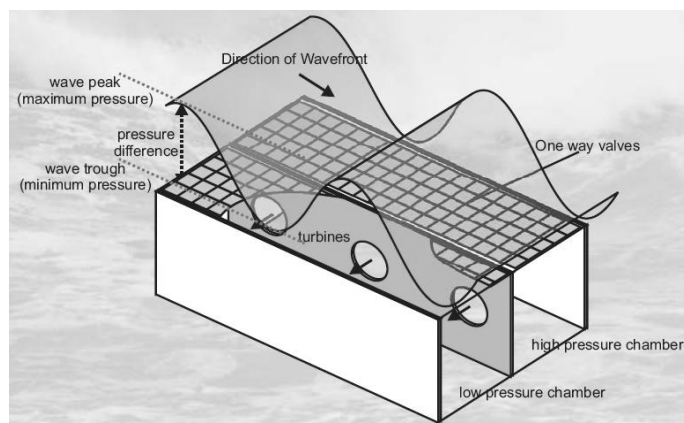


Fig.3.16 – Esquema do funcionamento do dispositivo WaveMaster (retirado de [28]).

A passagem da onda sobre o dispositivo cria zonas de sobrepressão relativamente ao nível estático sob as cristas e zonas de depressão sob as cavas. Como consequência, verifica-se a entrada de água na câmara de alta pressão nas zonas sob as cristas, que sai pela câmara de baixa pressão nas zonas sob as cavas, depois de passar pelas turbinas ([28], [29]). Naturalmente, à medida que a onda se vai deslocando sobre o dispositivo, as zonas de entrada e saída de água vão alternando.

Este dispositivo poderá produzir uma potência de cerca de 5 MW, para alturas de onda de cerca de 5m.

Anaconda

O Anaconda é um dispositivo extremamente simples. É constituído por um tubo de borracha flexível fechado, cheio de água, que flutua imediatamente abaixo da superfície da água, orientado perpendicularmente à frente de onda, na extremidade do qual existe uma turbina. Em repouso, a água no interior do tubo tem uma pressão homogénea, ligeiramente superior à pressão na superfície livre. Quando uma onda atinge a secção inicial, eleva esta relativamente ao restante comprimento. A elevação causa a alteração da pressão no interior do tubo: devido ao equilíbrio hidrostático, a pressão deixa de ser uniforme, sendo menor na zona elevada (com consequente diminuição da secção transversal) e aumentando ao longo do tubo, até se atingir a porção que ainda se encontra em repouso, onde é máxima e maior do que a inicial (com o consequente aumento da secção transversal). Isto gera uma onda no interior do tubo (*bulge wave* - onda de bolha) que se desloca ao longo do seu comprimento com uma dada celeridade [30]. Através da escolha adequada das características da borracha, consegue igualar-se a celeridade desta onda de bolha à da onda gravítica, obtendo-se assim um fenómeno de ressonância. Quando isto acontece, a bolha desloca-se ao longo do tubo imediatamente seguida da onda gravítica, figura 3.17. Assim, à medida que a onda gravítica vai elevando novas secções, vai aumentando a pressão na bolha (com o consequente aumento do seu volume e da transmissão de energia), até um máximo que se atinge na extremidade final do tubo. Nesta zona existe um dispositivo destinado a recolher a energia da bolha, por exemplo uma turbina Wells.

O mesmo efeito pode ser conseguido se o tubo estiver colocado no fundo do mar. Contudo, neste caso, as diferenças de pressão causadas no interior do tubo devidas às diferentes elevações, são substituídas pelas diferenças de pressão causadas pela altura de água variável à medida que a onda percorre o tubo.

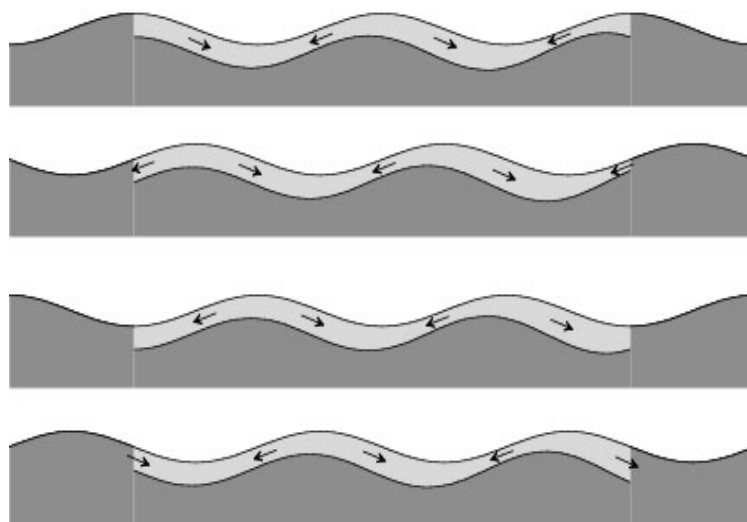


Fig.3.17 – Esquema do funcionamento do sistema Anaconda (as ondas vêm da esquerda) (retirado de [31]).

C-Wave

O C-Wave tira partido do facto de dois corpos colocados a uma determinada distância, mas ao longo da mesma ortogonal a uma frente de onda, se moverem, num dado instante, com sentido, direcções e velocidades diferentes (devido ao facto de as trajectórias das partículas excitadas pela onda serem circulares). Assim, considerando dois corpos, em que um está na crista e outro na cava, aproximam-se, caso um esteja na crista de uma onda e o outro na cava da anterior, ou afastam-se, caso um esteja na crista e o outro na cava da mesma onda.

O C-Wave é um dispositivo semi-submerso constituído por três placas verticais, paralelas, com espaçamentos diferentes, ligadas entre si por êmbolos hidráulicos. Quando as ondas passam pelo dispositivo, aproximam ou afastam as placas movendo os êmbolos, que fazem actuar sistemas de produção de energia. Para ser funcional, o espaçamento entre as placas deve ser cerca de meio comprimento de onda (para garantir um desfaseamento de 180° entre o movimento das placas adjacentes e, portanto, que nunca tenham velocidades com o mesmo sentido). Os dois espaçamentos entre as placas são diferentes para que se consiga operar com mais do que um comprimento de onda e em condições irregulares [32].

Este dispositivo, deverá ser instalado em condições *offshore*, a mais de 50 m de profundidade e fixo por âncoras.

3.3.5. GALGAMENTO

Os dispositivos por galgamento recolhem energia das ondas através da circulação da água por turbinas, do mesmo modo que se verifica em centrais hidroeléctricas, isto é, transformando energia potencial gravítica em electricidade. A designação de dispositivos por de galgamento vem do facto de, para transformar a energia da onda em energia potencial gravítica (e seguidamente em electricidade) parte, ou toda a estrutura, ter de ser galgada pela onda. Geralmente, estes sistemas têm uma rampa, ou algo semelhante, que recolhe a onda incidente, figura 3.18. Ao atingir a rampa, a onda espraia e sobe-a, sendo a massa de água conduzida a um reservatório elevado. A energia da onda, quer potencial, quer cinética, é assim convertida em energia potencial gravítica. O reservatório alimenta, por sua vez, uma turbina que produz electricidade e descarrega no mar.

Este dispositivos podem ser rigidamente fixados ou flutuantes e estar instalados na costa, próximos dela ou mesmo em *offshore*.

Na tabela 3.8 são apresentados alguns dos exemplos mais significativos desta tecnologia.

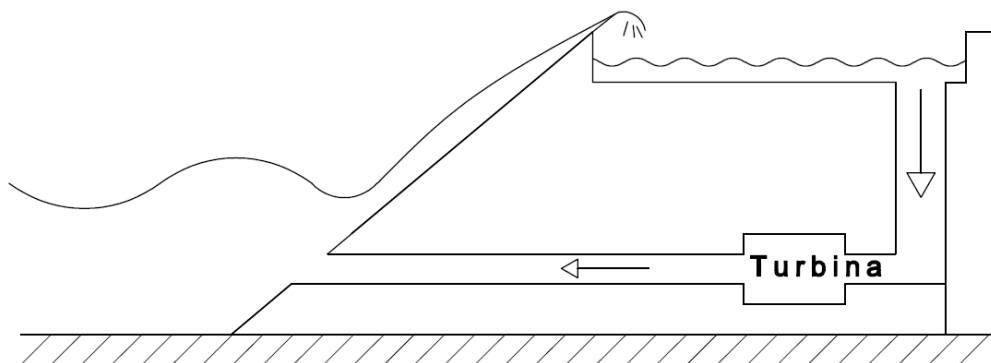


Fig.3.18 – Esquema do funcionamento de um sistema por galgamento.

Tabela 3.8 – Dispositivos por galgamento mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
Floating Wave Power Vessel	Seapower SE
TAPCHAN	-
WaveDragon	WaveDragon
Seawave Slot-cone Generator	Waveenergy AS
WavePlane	WavePlane AS

Os sistemas Seapower SE, Tapchan, Wave Dragon e Seawave correspondem à descrição apresentada, com algumas características gerais que importa salientar:

- o Wave Dragon é um sistema flutuante *offshore* e apresenta uma estrutura parabólica envolvendo o dispositivo, destinada a recolher uma frente de onda maior do que a simples largura da rampa ([10], [12], [33]);
- o sistema Wave Energy apresenta três reservatórios, localizados a níveis diferentes, e uma turbina multi-andares, de modo a captar mais energia e obter maior rendimento por cada onda incidente; este sistema pode ser colocado em *offshore*, *nearshore* ou *onshore*, de forma fixa ou flutuante [34].

Waveplane

O Waveplane é um sistema flutuante para instalação em *offshore* ou *nearshore*. Na sua parte frontal existe uma rampa que recebe as ondas e conduz a massa de água a um reservatório. O reservatório é dividido por lamelas inclinadas umas relativamente às outras, que escoam a água para um tubo, que corre ao longo da sua base, figura 3.19. A inclinação das lamelas destina-se a encaminhar a água de forma a que esta entre tangencialmente, ou aproximadamente, no tubo, provocando um escoamento rotacional no seu interior. O tubo conduz a água a uma turbina axial que, devido ao carácter rotacional do escoamento, tem a sua acção facilitada ([35], [36]). A água é posteriormente descarregada no mar. Este dispositivo poderá gerar uma potência de cerca de 200 kW.

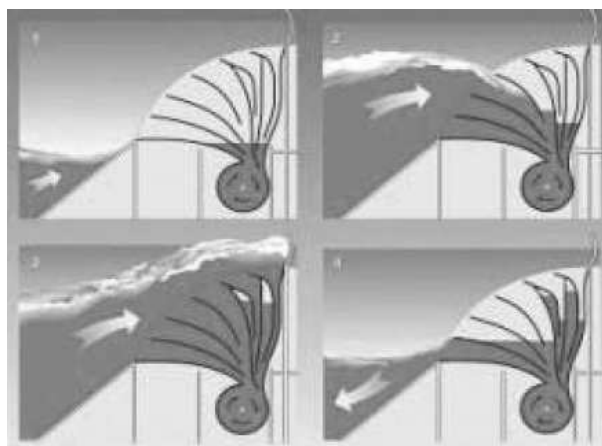


Fig.3.19 – Esquema do funcionamento do sistema Waveplane (retirado de [35]).

3.3.6. MAGNETO-HIDRODINÂMICO

Estes sistemas apresentam uma abordagem inovadora e completamente diferente da dos restantes dispositivos, estando apresentados na tabela 3.9 os mais significativos. Ao invés de se servirem de princípios da mecânica, como deslocamentos, oscilações, diferenças de pressão, etc., para a conversão da energia, estas tecnologias usam a lei de Faraday. Segundo esta lei, a passagem de um fluido condutor por um campo magnético produz electricidade [37]. Assim, a água, um fluido por natureza condutor devido à sua carga iónica, ao passar através de sistemas magnetizados adequados pode produzir electricidade.

Tabela 3.9 – Dispositivos magneto-hidrodinâmicos mais significativos.

Sistema	Desenvolvido por
SARA MWE	SARA Inc.
Neptune Systems Converter	Neptune Systems

Qualquer destes sistemas é caracterizado pela total ausência de partes móveis ou mecanismos, o que representa uma vantagem considerável sobre outros sistemas, nomeadamente em perdas por atrito, manutenção e falhas.

3.3.7. OUTROS

Nesta categoria estão incluídos os dispositivos, cujas particularidades não permitem, em rigor, inseri-los nas categorias anteriormente descritas.

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

Pendulor

O Pendulor é constituído por um caixotão fixo, semi-submerso, aberto na face exposta à agitação. Uma placa vertical, pendurada na abertura, gira em torno de um eixo horizontal coincidente com o bordo superior e que a suporta ([10], [11]). Quando uma onda atinge a placa, causa a sua rotação, accionando mecanismos hidráulicos que, por sua vez, accionam o gerador eléctrico.

Este tipo de dispositivo pode estar fixo na costa, em estruturas de defesa ou semelhantes, ou ser flutuante.

Wave Rotor (ECOFYS)

O Wave Rotor apresenta uma abordagem inovadora na conversão de energia das ondas. Dois conjuntos de pás, completamente submersos (um do tipo Wells e um do tipo Darrieus), fazem rodar um eixo vertical ([12], [20]): quando a onda passa pelo dispositivo, o campo de velocidades que esta cria na sua envoltória actua sobre as pás gerando uma força de sustentação que provoca a sua rotação e, por consequência, a do eixo, figura 3.20. O eixo roda sempre no mesmo sentido independentemente da direcção da onda e faz actuar o gerador produzindo electricidade. As características do Wave Rotor permitem-lhe recolher tanto energia das ondas, como das correntes. Este dispositivo deverá funcionar em profundidades entre 15-25 m e poderá gerar uma potência de cerca de 250 kW (20-30 kW/m de frente de onda).

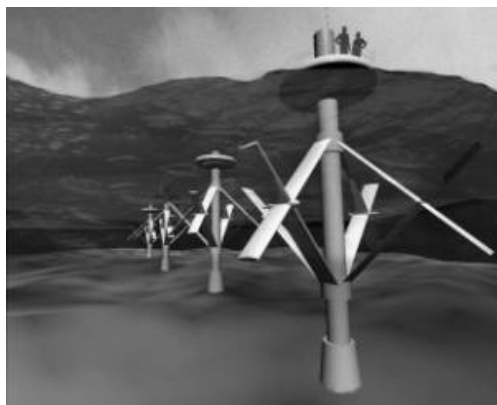


Fig.3.20 – Antevsão do dispositivo WaveRotor (retirado de [38]).

S.D.E. (S.D.E. Ltd)

Uma placa flutuante repousa na superfície livre da água e está fixada a uma estrutura rígida (quebra-mar, etc.) por um eixo existente num dos bordos, em torno do qual pode rodar. Quando a onda atinge a placa, devido à sua flutuabilidade, esta acompanha a elevação da superfície livre gerada pela onda (quer da crista, quer da cava) rodando em torno do eixo. Ligados à placa estão êmbolos hidráulicos que tiram partido do movimento de rotação para bombear óleo sob pressão, que acciona um motor que, por sua vez, acciona um gerador, produzindo energia [39].

Devido às características enunciadas, este dispositivo deverá estar fixado na costa, ou em estruturas fixas destacadas, como quebra-mares, etc. A sua potência, em protótipo, está estimada em 8 kW/m de frente de onda por metro altura de onda.

Treefinder Ocean Wave Energy Converter

O sistema Treefinder Ocean Wave Energy Converter é composto por um conjunto de rotores de Savonius, figura 3.21, horizontais, dispostos paralelamente de modo a formarem um plano que repousa imediatamente abaixo da superfície livre da água [40]. A passagem da onda pelo dispositivo cria um campo de velocidades na envoltória dos rotores, causando a sua rotação. Os rotores, por sua vez, accionam geradores eléctricos. As pás dos rotores são flexíveis de modo a diminuírem a projecção da superfície que se opõe ao escoamento quando se deslocam em sentido contrário a este, aumentando dessa forma o rendimento, isto é, quando o escoamento actua na face convexa das lâminas, estas deformam-se, enrolando-se e diminuindo, portanto, a sua área resistente. Este sistema pode estar rigidamente fixado ao fundo do mar, ou ancorado, caso em que terá de ter a adequada flutuabilidade.

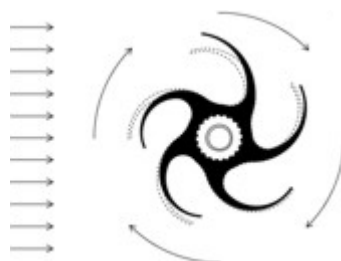


Fig.3.21 – Esquema do rotor tipo Savonius do dispositivo Treefinder Ocean Wave Energy Converter. Repare-se no pormenor da flexão das pás (retirado de [40]).

Grampus (OWEL Offshore Wave Energy Limited)

O Grampus é um sistema flutuante colocado em *offshore*, com um princípio de funcionamento semelhante ao da CAO.

Uma conduta horizontal, semi-submersa, aberta para o mar numa das extremidades, recolhe a onda incidente, figura 3.22. A altura da conduta na secção inicial é aproximadamente igual à altura da onda de projecto e o seu comprimento próximo do da mais longa onda prevista para as condições de funcionamento do dispositivo.

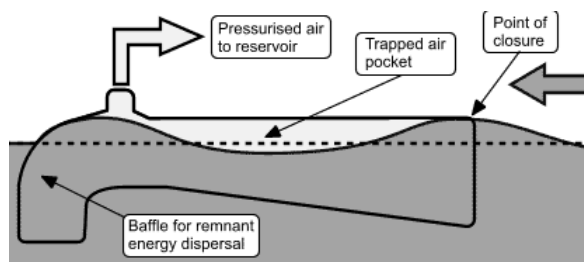


Fig.3.22 – Esquema do funcionamento do dispositivo Grampus (retirado de [41]).

À medida que a onda recolhida se desloca pela conduta, vai comprimindo o ar no seu interior que é armazenado sob pressão num reservatório de ar comprimido. Este reservatório alimenta uma turbina de ar comprimido que, por sua vez, faz actuar um gerador, produzindo electricidade. Este dispositivo deverá ser instalado a profundidades maiores do que 40 m e poderá gerar uma potência média próxima de 4 MW [41].

Rothman Wave Energy Machine (Rothman Energy Systems)

O Wave Energy Machine é um dispositivo relativamente simples. Uma treliça é fixada a uma estrutura na costa por uma das extremidades e na outra tem um flutuador que repousa na superfície livre da água. A fixação da treliça permite o seu movimento de rotação, no plano vertical que a contém. A passagem das ondas pelo flutuador desloca-o verticalmente causando a rotação da treliça. Esta rotação pode ser aproveitada de diversas maneiras para produção de energia [42].

SRI International

O sistema da SRI International, desenvolvido em colaboração com a japonesa Hyper Drive, está ainda numa fase inicial de desenvolvimento. Este sistema utiliza a tecnologia “*electroactive polymer artificial muscle*” para recolher energia das ondas [43]. Não foi possível obter mais informação acerca desta tecnologia.

3.3.8. MULTI POINT ABSORBERS

Estes sistemas não apresentam qualquer inovação ou diferença em relação aos apresentados na secção Point-Absorbers. Como o nome indica, estes dispositivos caracterizam-se apenas por reunirem numa mesma estrutura vários pontos de absorção de energia, por qualquer um dos métodos descritos na secção 3.3.3. Point Absorbers.

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as principais características de alguns modelos:

FO³ (Fred Olsen + ABB)

O FO³ tem uma aparência semelhante a uma plataforma de petróleo ou gás natural. Por baixo da estrutura repousam, sobre a superfície da água e suspensos da plataforma por meio de eixos verticais, vários flutuadores que se deslocam verticalmente sob acção das ondas. O movimento dos flutuadores é convertido em movimento rotacional por meio de um sistema hidráulico que faz actuar um motor que acciona o gerador eléctrico [44].

O FO³ deverá ser instalado em *nearshore* e poderá gerar uma potência próxima de 2,5 MW para ondas de 6 m de altura com períodos de cerca de 9 s.

Este sistema, como é claro, constitui um sistema múltiplo de um PA de deslocamentos relativos.

Wave Star (Wave Star Energy)

O Wave Star é uma estrutura emersa, oblonga, rigidamente fixada ao fundo do mar. Ao longo de cada lado da estrutura existe uma fila de flutuadores (vinte de cada lado) ligados à estrutura por braços articulados, formando uma figura semelhante a uma centopeia. O dispositivo está preparado para se orientar perpendicularmente à frente de onda conforme a direcção da agitação. À medida que a onda passa pelo dispositivo, vai elevando os sucessivos flutuadores e causando a rotação dos braços. Estes, por sua vez, fazem actuar êmbolos hidráulicos que bombeiam óleo a alta pressão para um motor que acciona um gerador produzindo electricidade ([45], [46]).

O Wave Star deverá operar a cerca de 10-20 km de distância da costa e poderá gerar uma potência de perto de 3 MW.

Este sistema, como é claro, constitui, também, um sistema múltiplo de um PA de deslocamentos relativos.

Manchester Bobber (University of Manchester)

Um flutuador ligado por um cabo a um contra peso, repousa na superfície livre da água. O cabo passa por uma roldana fixa a um eixo horizontal que, por sua vez, faz accionar o gerador eléctrico. O movimento das ondas sob o flutuador causa o seu movimento vertical, bem como do contra-peso, causando a rotação da roldana. Esta, por sua vez, faz girar o seu eixo que, accionando o gerador produz energia. Uma plataforma alberga um determinado número destes sistemas [47].

Este sistema, como é claro, constitui um sistema múltiplo de um PA de roldanas.

3.4. RESUMO

Neste capítulo fornece-se uma perspectiva geral sobre a tecnologia para conversão de energia das ondas, existente ou em desenvolvimento. Apesar de não ser exaustiva, a informação disponibilizada é suficiente para demonstrar a variabilidade e a actual instabilidade nesta área. Fica também clara a existência de bastante espaço para investigação e desenvolvimento, com vista à estabilização e optimização das tecnologias, de modo a que possam ser instaladas e exploradas de forma prática e com rendimentos e capacidades competitivos com as fontes de energia actuais.

Fica também exposto o potencial desta forma de exploração de energia por, dependendo da tecnologia em causa, poder ser utilizada para mais do que um fim, como protecção costeira, ou recreação, o que, geralmente, não é compatível com as formas de exploração de energia actuais. Quando comparada

com outras fontes renováveis como, por exemplo, a eólica e a solar, apresenta um impacto visual significativamente menor (pela menor dimensão dos equipamentos e/ou por não serem visíveis da costa e/ou por serem submersos).

Deixa-se também uma nota relativamente ao papel de Portugal neste domínio. Apesar de não ter sido referida nenhuma tecnologia portuguesa, ela está a ser desenvolvida por empresas como a Martifer e a Enerwave. No entanto, devido à falta de informação disponível, dificuldades em contactar as empresas e recusas da parte das mesmas em ceder informação, não foi possível fazer uma descrição dessa tecnologia.

4

SISTEMAS DE AMARRAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma descrição geral da tecnologia actual utilizada em amarrações, das suas características hidrodinâmicas fundamentais (orientada para o seu efeito no funcionamento de um dispositivo de conversão de energia das ondas) e dos modelos matemáticos que permitem estudar os esforços nos sistemas tradicionais.

4.2. NECESSIDADE, IMPORTÂNCIA E REQUISITOS DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES

A instalação de uma estrutura no mar acarreta a sua sujeição às seguintes acções: vento, ondas e correntes marítimas. Estas acções geram forças que se podem incluir numa de três categorias:

- forças estáticas (como, por exemplo, as geradas pelo vento e correntes) – têm um valor aproximadamente constante no tempo;
- forças directas das ondas – têm a mesma frequência de actuação que as ondas incidentes;
- forças de segunda ordem – resultam da acção das ondas, mas não têm a mesma frequência de solicitação que elas. Em condições de agitação regular estas forças seriam constantes. No entanto, na realidade, não existem condições de agitação regular e, por isso, estas forças variam lentamente ao variar a altura da onda, dando origem a uma força cíclica de grande período [48]. Apesar de estas forças serem relativamente fracas, o amortecimento da estrutura para a sua frequência de actuação é, geralmente, reduzido e, frequentemente, o seu período de actuação é próximo do período de oscilação natural da estrutura amarrada, podendo gerar esforços consideráveis.

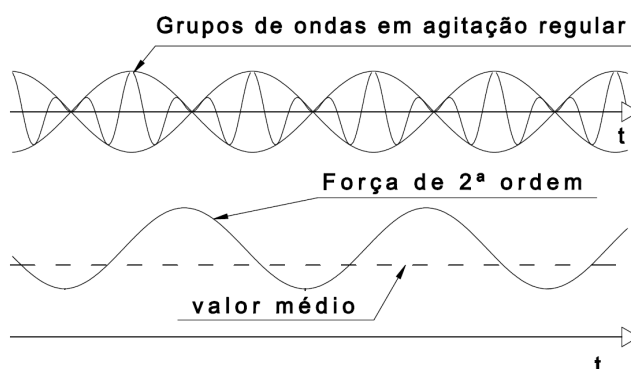


Fig.4.1 – Esquema do comportamento das forças de segunda ordem.

A existência das acções acima referidas torna necessária a fixação da estrutura. Em águas pouco profundas esta fixação pode ser feita por uma estrutura rígida. Em águas profundas, ou quando se procuram baixos custos, ou ainda no caso dos dispositivos de conversão de energia das ondas, quando se pretenda que a estrutura tenha uma certa liberdade de movimento, a fixação tem que ser feita por amarrações.

A existência da amarração condiciona o comportamento da estrutura quando esta é solicitada. No caso da produção de energia, se esta depender do movimento da estrutura, a amarração afecta profundamente o seu desempenho, ao contrário do que acontece numa típica estrutura *offshore* ([49], [50]). É, portanto, necessário analisar cuidadosamente o amortecimento, frequência de vibração natural e demais influências do sistema de amarrações. Além disso, os dispositivos serão certamente instalados em parques, ficando muito próximos uns dos outros, condição igualmente pouco habitual em estruturas *offshore*. A amarração deve ser estudada de modo a que os dispositivos não choquem entre si nem as suas amarras se entrelacem.

Podem estabelecer-se os seguintes requisitos do sistema de amarrações para um dispositivo de conversão de energia das ondas ([49], [50], [51]):

- limitação dos deslocamentos – ser suficientemente rígido para evitar os grandes deslocamentos causados por forças constantes, mas ao mesmo tempo permitir que a estrutura responda às forças de primeira ordem (forças de acção directa das ondas);
- facilidade de instalação;
- facilidade de posicionamento;
- elevado prazo de vida antes de substituição/manutenção;
- reduzida área ocupada no fundo do mar.

Os quatro últimos pontos existem por razões económicas: ao contrário das típicas estruturas *offshore*, as estruturas de produção de energia rendem relativamente pouco, pelo que os seus custos de instalação, bem como os de manutenção, têm que ser mais reduzidos. Além disso, para aproveitar da melhor forma uma área concessionada à exploração de energia, procurar-se-á maximizar a concentração dos dispositivos, pelo que a área ocupada por cada um deve ser a menor possível.

4.3. TIPOS DE AMARRAÇÕES

De um modo geral, as amarrações podem dividir-se em dois grupos: as amarrações metálicas e as amarrações de materiais sintéticos ou sintéticas (por exemplo, nylon, poliéster, polietileno de elevado módulo, HMPE). Esta divisão (em relação ao material constituinte) é, em princípio, suficiente, uma vez que o funcionamento da amarração é fortemente condicionado pelo material: as amarrações metálicas, devido ao elevado peso linear, funcionam, geralmente, pelo peso próprio, e as sintéticas, devido ao reduzido peso próprio e relativamente elevada elasticidade, funcionam pela elasticidade. Assim sendo, quando dispostas no mar, as amarrações metálicas assumem o perfil de uma catenária, figura 4.2, respondendo à aplicação de forças exteriores por deformação do perfil em catenária. As sintéticas, por sua vez, assumem um perfil rectilíneo, figura 4.2, uma vez que para se tirar partido do efeito da elasticidade têm que estar esticadas, respondendo à aplicação de forças exteriores por variação da sua extensão.

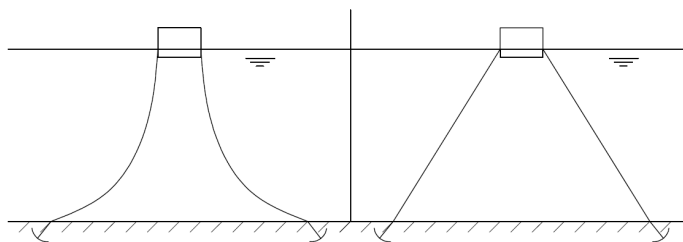


Fig.4.2 – Amarração em catenária (à esquerda) e amarração sintética (à direita).

As amarrações metálicas são as mais comumente utilizadas e podem materializar-se em dois tipos: as correntes e os cabos.

As correntes são formadas por uma sucessão de elos que podem ser de dois tipos: com e sem estais, figura 4.3. As correntes com estais são fortes, fiáveis e fáceis de manejar, o que facilita a sua colocação. As correntes sem estais são mais leves, para a mesma resistência, e têm maior resistência à fadiga, mas são mais difíceis de manejar. Como têm maior peso linear do que os cabos, geralmente as correntes têm uma maior capacidade de absorção de energia. No entanto, são apenas tão fortes quanto o seu elo mais fraco. São também susceptíveis à ocorrência de roturas frágeis [52].

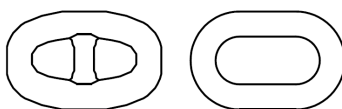


Fig.4.3 – Diferentes tipos de elos: à esquerda elo com estais e à direita elos sem estais.

Os cabos são formados por cordões que, por sua vez, são constituídos por fios, podendo ser de dois tipos: de cordão único e de multi-cordão. Os cabos de cordão único são formados por apenas um cordão, ou, doutro modo, formados directamente por fios. Os cabos multi-cordão são formados, como o nome indica, por vários cordões. Os cabos multi-cordão são utilizados preferencialmente em instalações temporárias, por serem fáceis de manejar, sendo o cabo de seis cordões o mais divulgado. Dentro deste tipo de cabos existem várias classes, em função do número de fios nos cordões e do número de cordões nos cabos, com diferentes características de flexibilidade, resistência à fadiga e resistência à abrasão. Os cabos de cordão único são preferencialmente utilizados em instalações permanentes e são mais resistentes à fadiga do que os cabos multi-cordão [51].

O ângulo de inclinação dos fios no cordão determina a sua flexibilidade e rigidez axial. Como são mais leves do que correntes com a mesma resistência, os cabos absorvem menos energia por deformação do seu perfil de catenária. No entanto, são mais elásticos, o que significa que o seu comportamento é, geralmente, tão bom quanto o de uma corrente de igual resistência. O elevado número de fios num cabo torna pouco provável a ocorrência de roturas frágeis. São, no entanto, susceptíveis a roturas por fadiga, sobretudo na zona de ligação à estrutura [52].

As amarrações sintéticas são relativamente recentes e ainda pouco usadas. O seu uso adveio da necessidade de explorar profundidades cada vez maiores para procura de combustíveis fósseis: para grandes profundidades as amarrações metálicas assumem pesos e dimensões que se tornam incomportáveis. Em relação a este tipo de amarrações podem indicar-se as seguintes vantagens [51]:

- mais leves;
- muito flexíveis;
- conseguem absorver esforços dinâmicos por extensão sem causar excessiva tensão dinâmica;
- mais curtas (funcionam esticadas);
- reduzidos valores de deslocamentos para médias e baixas frequências de solicitação;
- menores tensões no ponto de ligação à estrutura;
- menor área ocupada no fundo do mar;
- menores esforços verticais na estrutura.

Apresentam também as seguintes desvantagens [51]:

- as propriedades dos materiais são menos conhecidas e mais complexas;
- pouca experiência na sua utilização;
- utilização de grandes factores de segurança no seu dimensionamento, devido aos dois pontos anteriores, o que pode anular algumas das suas vantagens;
- o atrito entre as fibras internas dos cabos, causado pelos carregamentos cíclicos, gera calor que, no caso de cabos com grandes diâmetros, tem dificuldade em dissipar-se e pode mesmo derreter as fibras;
- o comportamento à fadiga não é bom, especialmente nas extremidades, onde o cabo é ou comprimido radialmente, ou torcido. A principal razão para o problema é a existência de compressão localizada (apesar do cabo estar traccionado, podem existir zonas sob compressão, o que tem como consequência a instabilização das fibras e a sua dobra);
- podem ser danificadas por objectos aguçados;
- as partículas em suspensão na água podem ficar presas no cabo e provocar o desgaste das fibras por abrasão;
- a resistência dos cabos é cerca de metade de um cabo metálico de igual diâmetro.

4.4. MODO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES

Um sistema de amarrações é constituído, basicamente, por dois componentes: as âncoras e as amarras. As âncoras assentam no fundo do mar, a uma determinada distância da estrutura. As amarras estão, numa extremidade, fixadas às âncoras e, na outra, à estrutura, figura 4.4.

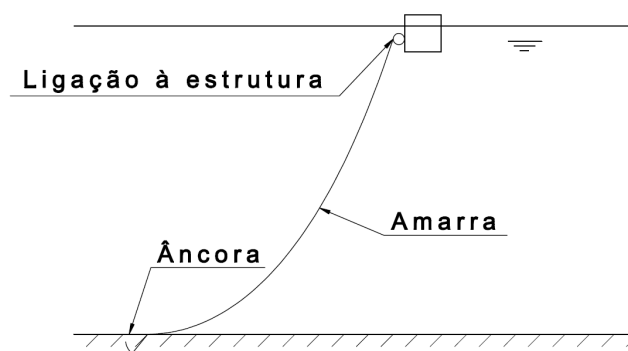


Fig.4.4 – Constituintes de um sistema de amarração.

Numa situação inicial, em que não esteja aplicada qualquer força exterior ao sistema constituído pela estrutura e pelas amarrações, a resultante de forças na estrutura, incluindo as das amarrações, é nula,

bem como o seu deslocamento em relação à posição de repouso pretendida. A aplicação de forças exteriores à estrutura altera o equilíbrio de forças causando, naturalmente, o deslocamento da mesma. O deslocamento da estrutura provoca, por sua vez, a alteração das forças nas amarrações.

À medida que a estrutura se desloca, gera-se nas amarrações uma força de sentido contrário à força exterior que, ao fim de um determinado deslocamento, acabará por equilibrá-la. O efeito é semelhante àquele que existiria se a estrutura fosse fixada por um conjunto de molas (mas de comportamento não linear). Esta força tem o nome de força de restituição.

Se a força exterior aplicada for estática, a força na amarração mantém-se constante e a estrutura permanece deslocada de um certo valor enquanto a força actuar. Se a força for cíclica, a força nas amarrações também varia ciclicamente, gerando-se um movimento oscilatório.

A tensão existente numa amarração, sujeita a solicitações cíclicas, divide-se em duas componentes: a tensão estática e a tensão dinâmica. A tensão estática é aquela que se gera nas amarrações quando a estrutura sofre um certo deslocamento sob acção de uma força estática. Quando actua uma força dinâmica é a tensão que se geraria na amarração se a estrutura fosse deslocada de um valor igual ao imposto pela solicitação dinâmica, mas sob acção de uma força estática. A tensão dinâmica é o excesso de tensão gerado devido à natureza dinâmica da força.

Nas amarrações em catenária, as forças de restituição desenvolvem-se por alteração do perfil da amarra. Nas amarrações sintéticas essas forças desenvolvem-se por variação da extensão das amarras, figura 4.5.

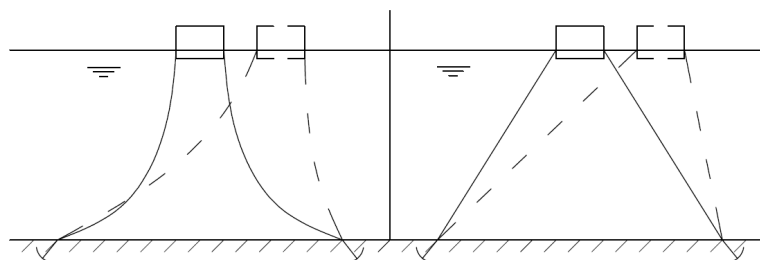


Fig.4.5 – Funcionamento de uma amarração em catenária (à esquerda) e de uma amarração sintética (à direita).

É frequente a utilização, em sistemas de amarração, de âncoras que apenas resistem a forças horizontais (por atrito com o fundo do mar). Assim, em projecto, dever-se-á garantir que a força na extremidade da amarra fixa à âncora é sempre horizontal. Para tal, adicionam-se pesos na extremidade inferior da amarra, ou usam-se amarras ligeiramente mais compridas do que o mínimo necessário, de modo a garantir que existe sempre uma porção de cabo assente no fundo e que, portanto, a força na âncora é horizontal. Quando se pretender que as âncoras resistam a forças com componente vertical, por exemplo, no caso de utilização de materiais sintéticos, tem que se estudar âncoras especiais capazes de resistir a essa componente, como âncoras de elevado peso, ou estacas, estas últimas funcionando por atrito das suas paredes laterais com o leito marinho que as envolve.

Como foi dito anteriormente, na situação em que o deslocamento da estrutura é nulo, a resultante das forças das amarrações na estrutura é também nula. No entanto, a tensão em cada amarra individual pode não o ser e, em geral, não é. A tensão das amarrações nesta situação é designada por pré-tensão. Quanto maior for a pré-tensão, maior será a rigidez do sistema, isto é, menor será o deslocamento conseguido com uma dada força. Para um dado comprimento da amarra, a pré-tensão pode ser

ajustada alterando-se o posicionamento das âncoras que as fixam ao fundo do mar, isto é, alterado o perfil no caso das catenárias, ou a extensão no caso das sintéticas .

De modo a facilitar o cálculo, as amarras são muitas vezes distribuídas simetricamente em torno da estrutura. No entanto, uma distribuição assimétrica pode ser mais vantajosa, como no caso de solicitações com uma direcção predominante, ou se existirem singularidades no fundo marinho, como oleodutos, cabos eléctricos, etc. [51], figura 4.6.

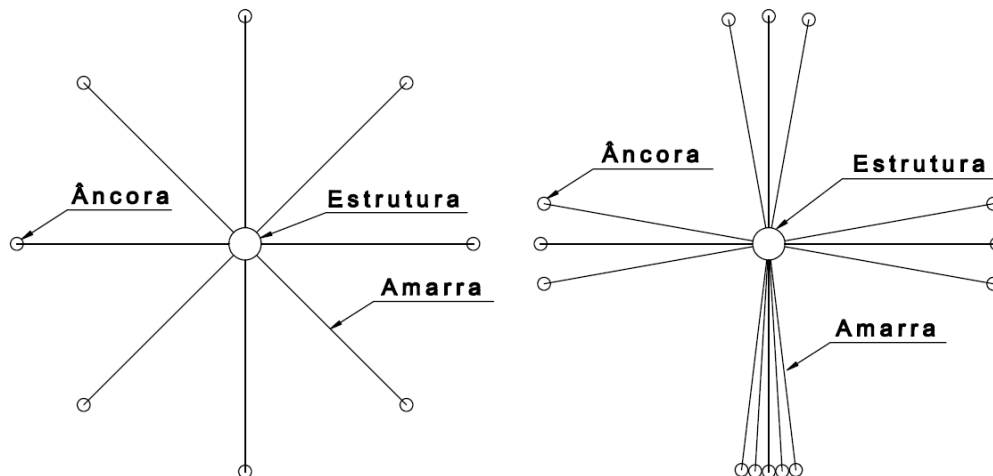


Fig.4.6 – Diferentes configurações do sistema de amarração.

Na sua forma mais simples, as amarras são fixadas à estrutura em vários pontos do seu contorno. Como resultado, a orientação da estrutura é praticamente fixa, o que pode gerar esforços consideráveis nas amarrações, quando solicitadas. Para corrigir este problema desenvolveu-se um sistema em que as amarras são fixadas à estrutura todas no mesmo ponto (*Single Point Moorings Systems*). A zona de fixação tem mecanismos que permitem a rotação da estrutura em torno do eixo vertical, de modo a que esta possa rodar sem interferir com a configuração das amarras, causando assim menores esforços nas mesmas.

Também para reduzir os esforços nas amarrações passaram a utilizar-se recentemente propulsores. Parte do esforço de posicionamento e fixação da estrutura é transferido para os propulsores, reduzindo-se os esforços nas amarrações. Este sistema é designado por posicionamento dinâmico. Os sistemas sem propulsores são designados por sistemas passivos.

4.5. ESTUDO DA CATENÁRIA

Neste ponto serão apresentadas as expressões que permitem o estudo de amarrações com perfil de catenária. Não serão feitos os desenvolvimentos das expressões por estarem fora do âmbito deste trabalho.

As mais importantes expressões para o estudo de uma catenária são as que a seguir se apresentam:

Componente horizontal da força na amarra:

$$F_H = \frac{w l}{\cosh^{-1}\left(\frac{w h}{F_H} + 1\right)} \quad (4.1)$$

Componente vertical da força na amarra para uma dada coordenada s:

$$F_V = w \times s \quad (4.2)$$

Força total na amarra num ponto com uma altura y:

$$F = F_H + w y \quad (4.3)$$

Comprimento da amarra até uma dada abcissa:

$$s = \frac{F_H}{w} \sinh\left(\frac{w x}{F_H}\right) \quad (4.4)$$

Altura de um dado ponto com uma dada abcissa:

$$y = \frac{F_H}{w} \left(\cosh\left(\frac{w x}{F_H}\right) - 1 \right) \quad (4.5)$$

As variáveis são as indicadas na figura 4.7, em que w representa o peso submerso da amarra. Para a utilização das expressões na forma apresentada, é fundamental a utilização do referencial indicado na figura 4.7.

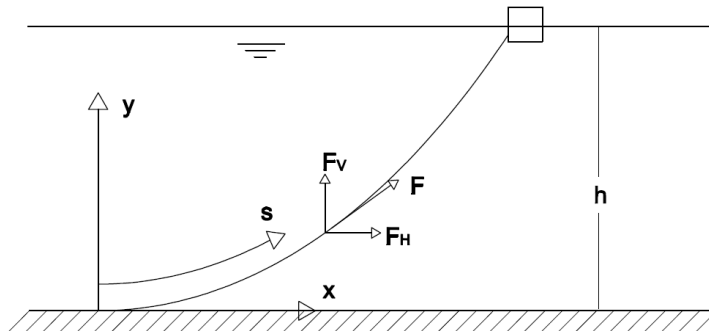


Fig.4.7 – Referencial para o estudo da catenária.

Estas expressões só podem ser aplicadas directamente se a amarração, na extremidade inferior, tiver tangente horizontal e não houver nenhuma porção de amarra assente no fundo. Se a tangente na extremidade inferior não for horizontal (isto é, se a amarra estiver tão esticada que a força na âncora tenha alguma componente vertical) tem que se determinar a posição do ponto fictício em que tal aconteceria e aplicar as expressões a partir dele. No caso de parte do comprimento da amarra estar assente no fundo, como se representa na figura 4.8, o cálculo das forças segue um procedimento iterativo: vão-se experimentando diferentes comprimentos de amarra assente no fundo e calculando as forças até o sistema estar em equilíbrio. Neste caso, as expressões só podem ser aplicadas à porção de amarras entre a estrutura e o ponto em que o cabo toca no fundo.

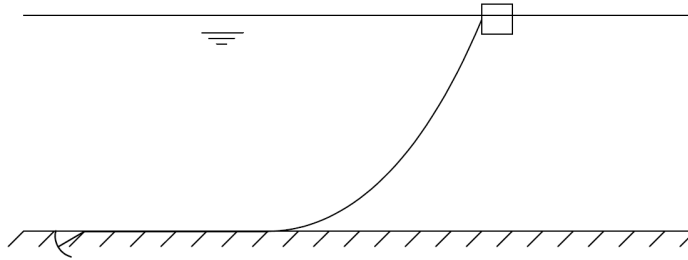


Fig.4.8 – Amarra parcialmente assente no fundo.

Combinando as expressões anteriores é possível obter outras que reduzam o número total de expressões a usar para cada estudo particular.

Analisando a expressão (4.1) verifica-se que F_H aparece dentro e fora do argumento de $\cosh^{-1}()$, pelo que a sua resolução tem que ser iterativa. No entanto, para um determinado perfil da catenária, a expressão só tem que ser resolvida uma vez, pois, como se verifica, a componente horizontal da força não depende do ponto da catenária que está a ser estudado.

4.6. AMORTECIMENTO

A caracterização do amortecimento é indispensável no estudo de qualquer oscilador. Numa estrutura flutuante amarrada, o amortecimento actuante pode ser devido aos seguintes factores ([49], [51]):

- atrito entre a estrutura e o ar (pequena contribuição);
- radiação, isto é, formação de ondas;
- amortecimento gerado pela velocidade relativa entre a estrutura e a água quando existem correntes e/ou movimentos de baixa frequência causados por forças de segunda ordem. Este amortecimento é devido ao atrito viscoso e à formação de vórtices;
- amortecimento devido às forças de segunda ordem (*wave drift*) relacionado com a variação da força de deriva causada pela variação da velocidade de deriva;
- amortecimento devido à existência de amarrações.

O amortecimento devido às amarrações pode, em determinadas circunstâncias, ser até 80% do amortecimento total existente no sistema. É, assim, necessário o seu conhecimento pormenorizado. O amortecimento causado pelas amarrações tem as seguintes origens ([49], [51]):

- atrito entre as amarras e a água – deslocamentos pequenos da estrutura podem causar grandes deslocamentos dos cabos, gerando elevadas forças de atrito, figura 4.9;
- atrito entre as amarras e o fundo do mar;

- atrito interno entre os elementos da amarração (fios, elos, fibras, etc.);
- formação de vórtices – a existência de escoamento através das amarras gera vórtices que provocam o deslocamento destas na perpendicular ao escoamento, aumentando as forças de atrito. Este efeito é mais significativo em cabos do que em correntes.

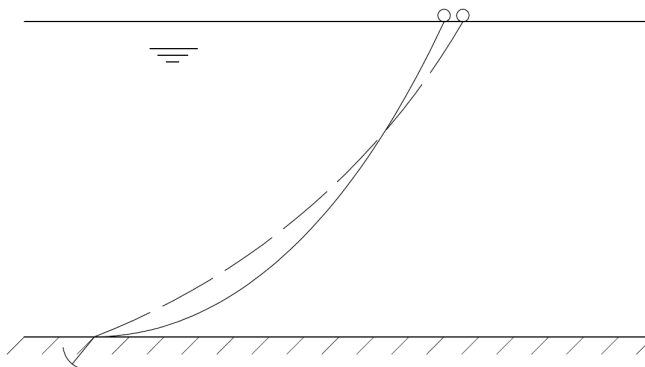


Fig.4.9 – Pequenos deslocamentos da estrutura que podem causar grandes deslocamentos das amarras.

4.7. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AMARRAÇÕES

4.7.1. INTRODUÇÃO

Existem três metodologias básicas de dimensionamento de um sistema de amarrações: o método estático, o método quase-estático e o método dinâmico, cada uma com um grau de pormenorização e complexidade maior do que a anterior. O desenvolvimento de cada método está fora do âmbito deste trabalho, pelo que não será feito. Apenas serão apresentadas as características gerais mais importantes de cada um.

4.7.2. MÉTODO ESTÁTICO

Este método é utilizado no pré-dimensionamento dos sistemas de amarrações. Nesta fase, as forças exercidas pela água no sistema de amarrações são desprezadas, bem como as mais importantes características dinâmicas das solicitações. Devido à sua simplicidade, este método utiliza grandes factores de segurança e considerações conservadoras na natureza das solicitações aplicadas ao sistema, o que se pode revelar desvantajoso.

4.7.3. MÉTODO QUASE-ESTÁTICO

Este é um procedimento intermédio entre o método estático e o dinâmico. Através dele pode fazer-se o estudo do sistema de amarrações no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo considera-se a existência de forças de segunda ordem e que são constantes as solicitações do vento e das correntes, e desprezam-se os efeitos dinâmicos das amarrações. No domínio da frequência lineariza-se a rigidez do sistema de amarrações e os efeitos de segunda ordem são tratados como se se estivesse a estudar um sistema linear com um grau de liberdade.

As principais diferenças para o método estático são o facto de ser não-linear, pois considera que a rigidez do sistema de amarrações varia com o deslocamento da estrutura, das equações de movimento serem integradas no domínio do tempo, de considerar os efeitos de massas adicionais (a ver mais à frente) e amortecimento, apesar de serem geralmente associadas à estrutura e não ao sistema de

amarrações, e de ser possível obter soluções no domínio da frequência, caso se considere a linearização da rigidez e do amortecimento.

4.7.4. MÉTODO DINÂMICO

Este método considera os esforços causados pelo sistema de amarração devidos ao amortecimento gerado pelo deslocamento das amarras na água, os efeitos de inércia gerados pela interacção das amarras com a água e a oscilação na extremidade superior das amarras.

As principais dificuldades resultantes da aplicação deste método são: o elevado esforço de cálculo envolvido; o elevado número de situações a estudar, para que se considerem as diversas combinações de solicitações possíveis; o elevado intervalo de tempo a estudar, de modo a abranger os períodos dos efeitos de segunda ordem; os curtos incrementos temporais na análise, para que seja possível estudar as oscilações das amarras e a dificuldade em estabelecer correctamente o amortecimento devido ao sistema de amarrações.

5

CARACTERÍSTICAS DE UM CORPO FLUTUANTE, PRODUÇÃO DE ENERGIA E LARGURA DE CAPTURA

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão referidos os principais conceitos relativos ao comportamento de um corpo flutuante sob a acção da agitação marítima, bem como uma introdução ao conceito de conversão de energia das ondas a partir do movimento de corpos flutuantes.

5.2. NOTAÇÃO COMPLEXA

Neste capítulo, ao contrário dos anteriores, vai ser utilizada uma notação em números complexos, em vez de funções trigonométricas, para descrever a elevação da superfície livre no tempo e no espaço, bem como para outros fenómenos com variação, no tempo, ou no espaço, do tipo sinusoidal. A adopção desta notação relaciona-se com dois factores fundamentais. O primeiro é o facto de a maior parte da bibliografia que aborda este tema utilizar a notação complexa e, portanto, a maior parte dos resultados práticos ser expressa na forma complexa. O segundo é o facto de, no que se segue, ao contrário dos temas tratados anteriormente, ser importante a fase de uma determinada variação sinusoidal e a notação complexa permitir codificar de forma simples a informação relativa quer à amplitude, quer à fase. Por exemplo, um oscilador mecânico típico, quando excitado por forças exteriores com variação temporal sinusoidal, apresentará uma resposta oscilatória com uma frequência igual à da excitação. Verifica-se uma ligeira diferença de fase e em notação trigonométrica, o seu deslocamento poderá ser expresso da seguinte forma:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \kappa) \quad (5.1)$$

em que A é a amplitude dos deslocamentos, ω é a frequência angular e κ é a constante de fase.

A velocidade e a aceleração do oscilador serão obtidas, respectivamente, através da primeira e da segunda derivadas da expressão (5.1):

$$\dot{x}(t) = -\omega A \sin(\omega t + \kappa) \quad (5.2)$$

$$\ddot{\chi}(t) = -\omega^2 A \cos(\omega t + \kappa) \quad (5.3)$$

Quando se utiliza a notação complexa, o deslocamento é expresso da seguinte forma:

$$\chi(t) = \bar{\chi} e^{i\omega t} \quad (5.4)$$

em que χ é o deslocamento complexo, e $\bar{\chi}$ é a amplitude complexa do deslocamento, que contém tanto a informação relativa à amplitude, como a relativa à fase.

Sendo esta amplitude um número complexo, é composta por uma parte real e por uma parte imaginária, ou seja:

$$\bar{\chi} = \bar{\chi}_{real} + i \bar{\chi}_{imaginário} \quad (5.5)$$

A amplitude do deslocamento obtém-se pela seguinte expressão:

$$A = \sqrt{\bar{\chi}_{real}^2 + \bar{\chi}_{imaginário}^2} \quad (5.6)$$

e a fase por:

$$\kappa = \arctan\left(\frac{\bar{\chi}_{imaginário}}{\bar{\chi}_{real}}\right) \quad (5.7)$$

Ao longo deste capítulo, sempre que não for de outra forma especificado, deverá ser considerado que apenas se toma a parte real em todas as expressões e equações que envolvam notação complexa.

A definição de velocidades e acelerações é análoga à utilizada em notação trigonométrica:

$$\dot{\chi}(t) = i\omega \bar{\chi} e^{i\omega t} \quad (5.8)$$

$$\ddot{\chi}(t) = -\omega^2 \bar{\chi} e^{i\omega t} \quad (5.9)$$

em que $i\omega \bar{\chi}$ é a amplitude complexa da velocidade e $-\omega^2 \bar{\chi}$ é a amplitude complexa da aceleração.

Os valores da amplitude real da fase e aceleração obtêm-se como descrito acima para os deslocamentos.

5.3. CENTRO DE IMPULSÃO, METACENTRO E CENTRO DE FLUTUAÇÃO

Considere-se o corpo flutuante representado na figura 5.1. Nestas condições, o corpo está sujeito a dois tipos de forças: a força da gravidade ou peso e a impulsão que o fluido exerce no seu contorno. Admitindo que o corpo está em equilíbrio, têm que se verificar as seguintes condições:

- a resultante de forças horizontais no contorno é nula, ou seja, por exemplo, a componente horizontal da impulsão exercida no lado direito tem que ser igual e oposta à componente horizontal exercida no lado esquerdo;
- a resultante de forças verticais é nula, ou seja, a componente vertical da impulsão tem que ser igual e oposta ao peso do corpo.

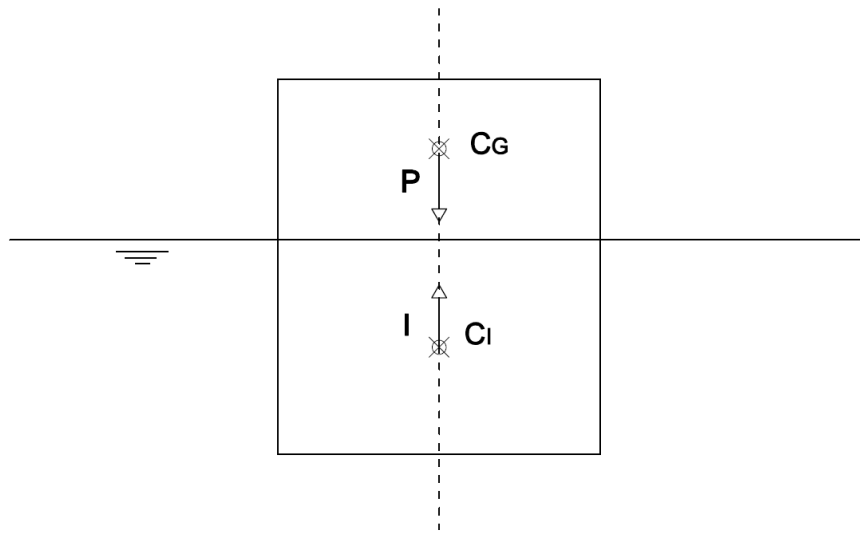


Fig.5.1 – Corpo flutuante em equilíbrio estático.

Pelo Teorema de Arquimedes sabe-se que a força vertical exercida sobre um corpo, por um fluido, é igual e oposta ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo, ∇ . O corpo na figura 5.1 desloca, portanto, um volume de fluido com peso igual ao seu. A posição do centro de gravidade do volume submerso do corpo (admitindo que este volume é homogeneamente preenchido na sua totalidade) é designada por centro de impulsão, C_I :

$$C_I = \frac{1}{\nabla} \int \int \int_{V_S} r \, dv \quad (5.10)$$

em que ∇ , é o volume submerso, r o vector de posição e V_S indica que o integral é calculado ao longo do volume submerso do corpo. O centro de impulsão é o ponto onde se pode considerar aplicada a resultante das forças de impulsão.

Numa situação de equilíbrio estático, como a definida, o centro de gravidade e o centro de impulsão têm que estar na mesma vertical. De outro modo, surgiria um binário, causado pela força de impulsão e pelo peso, que causaria a rotação do corpo.

Considere-se agora o mesmo corpo, mas ligeiramente inclinado, figura 5.2.

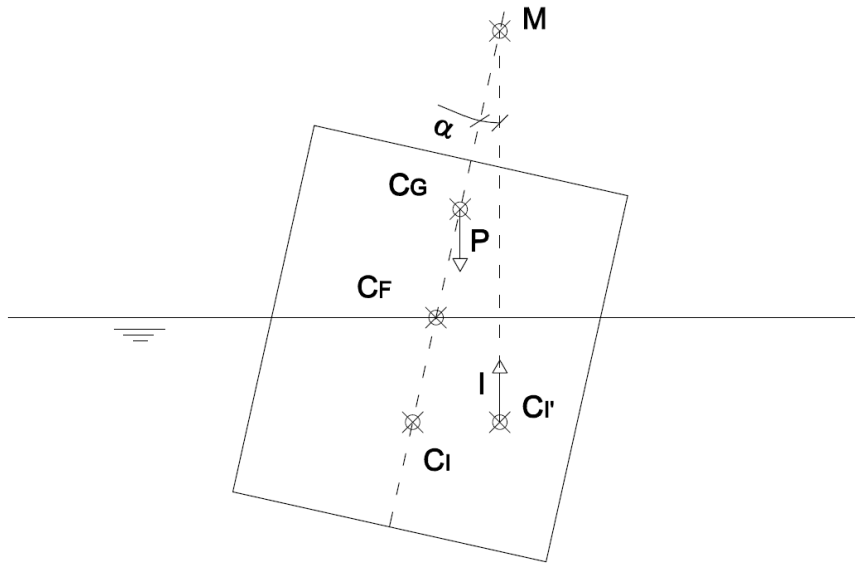


Fig.5.2 – Corpo flutuante ligeiramente inclinado.

Relativamente ao corpo, a posição do centro de gravidade mantém-se, mas a alteração da geometria submersa provoca a alteração da posição do centro de impulsão de C_I para C_I' e o aparecimento de um binário, dado pela seguinte expressão:

$$P \times \overline{C_G M} \sin(\alpha) = I \times \overline{C_G M} \sin(\alpha) = \forall \rho g C_G M \sin(\alpha) \quad (5.11)$$

em que P é o peso do corpo e α é o ângulo que a linha de acção inicial do peso e da impulsão faz com a vertical.

O ponto de cruzamento da nova linha de acção da impulsão com a linha de acção original, é designada por metacentro, M , e, para ângulos até 10-15 °, pode considerar-se fixo [53]. A distância entre o centro de gravidade e o metacentro, $\overline{C_G M}$, é designada por altura metacêntrica e considera-se positiva quando o metacentro está acima do centro de gravidade e negativa quando está abaixo. Como um corpo flutuante pode efectuar rotações em torno de dois eixos horizontais, considera-se em geral que um corpo tem dois metacentros: um transversal, relacionado com rotações em torno do eixo paralelo à maior dimensão horizontal do corpo, e um longitudinal, relacionado com as rotações em torno do eixo horizontal perpendicular ao anterior.

Tal como foi descrito anteriormente, um corpo flutuante ao ser inclinado (sujeito à acção de momentos horizontais), sofre uma rotação em torno de eixos horizontais que passam pelo centro de flutuação, C_F . O centro de flutuação é o centro de gravidade da secção horizontal do corpo pelo plano da linha de água e é o ponto de rotação de um corpo flutuante livre quando sujeito à acção de momentos horizontais. Para pequenas inclinações, pode considerar-se que a sua posição é constante [54].

Como se pode verificar pela figura 5.3, à medida que o corpo vai sendo inclinado, a posição do metacentro varia. Enquanto o metacentro permanecer acima do centro de gravidade (altura metacêntrica positiva), o binário originado pelo peso e pela impulsão é estabilizador e força o corpo a voltar à sua posição inicial, sendo designado por momento de restituição. A partir do instante em que o

metacentro fica abaixo do centro de gravidade (altura metacêntrica negativa) o binário passa a ter características instabilizadoras e o corpo tomba. O metacentro é, então, uma característica da estabilidade do corpo: quanto mais alto for, mais estável será o corpo.

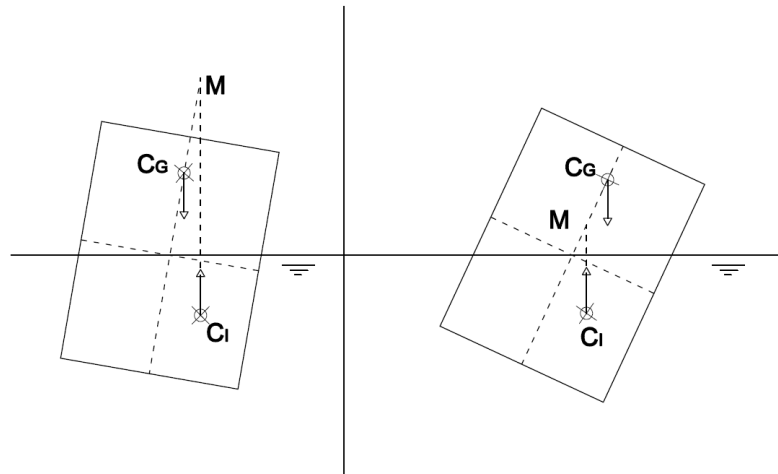


Fig.5.3 – Variação da posição do metacentro em função da inclinação.

Um corpo em que o centro de impulsão esteja acima do centro de gravidade é sempre estável, porque, neste caso, o metacentro está sempre acima do centro de gravidade. No caso de um corpo submerso, o metacentro coincide com o centro de impulsão e estes dois, tal como o centro de gravidade, têm uma posição fixa em relação ao corpo. Nesse caso, o corpo é estável se o centro de gravidade estiver abaixo do centro de impulsão e instável no caso contrário, figura 5.4. Poderia, eventualmente, ser estável com o centro de impulsão abaixo do centro de gravidade, se os dois estivessem exactamente na mesma vertical, mas como esta condição é praticamente impossível de garantir, o equilíbrio, a existir, será precário.

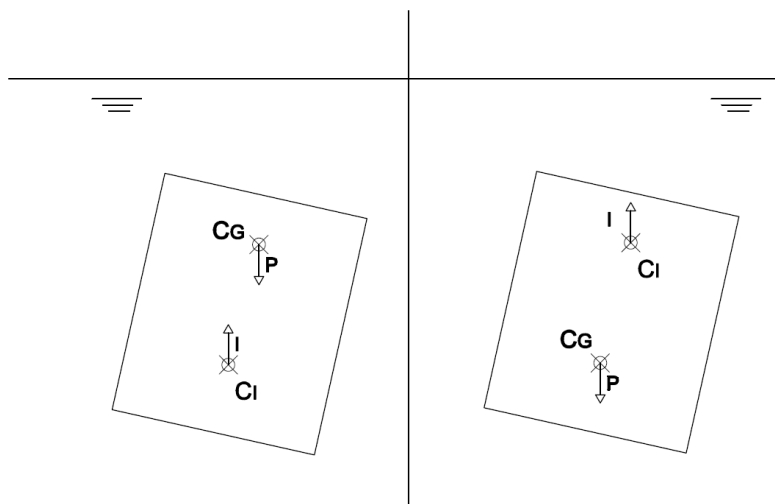


Fig.5.4 – Equilíbrio de um corpo submerso.

Considere-se agora a figura 5.5. O corpo representado é simétrico ao longo do eixo dos yy e a sua geometria não apresenta descontinuidades na zona próxima da linha de água, variando, quando muito, de forma muito suave. Para pequenas rotações, o ponto O (centro de flutuação) é praticamente fixo.

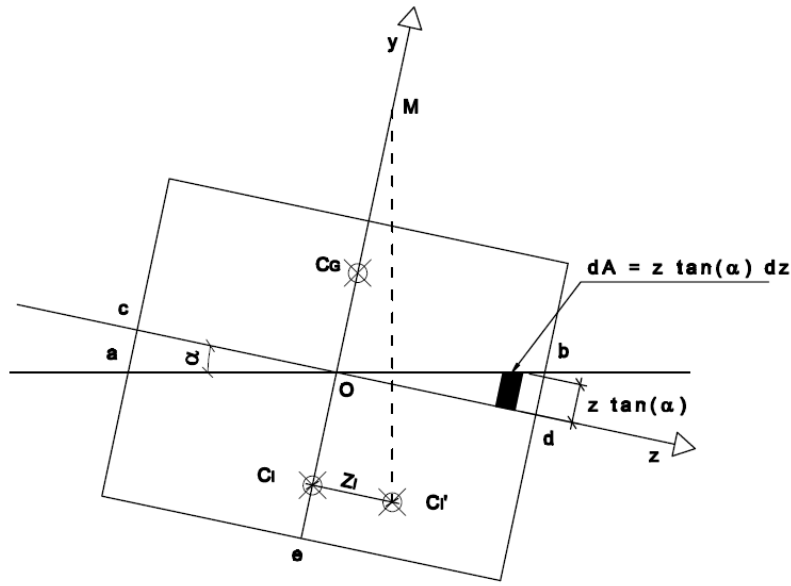


Fig.5.5 – Determinação analítica do metacentro.

A rotação do corpo causa a emersão da parcela cOa e a submersão da parcela Obd. Como o volume submerso tem que ser constante, a parcela cOa é equivalente à parcela Obd. A nova posição do centro de impulsão pode ser calculada da seguinte forma:

$$z_I \times V_{aObde} = \int_{cOdea} z dv + \int_{Obd} z dv - \int_{cOa} z dv \quad (5.12)$$

Por simetria, o primeiro integral é nulo. Fazendo dv igual a $L \cdot dA$, em que L é a dimensão transversal ao plano da figura e da é o elemento de área no plano, e sabendo que V_{aObde} é igual a ∇ :

$$\begin{aligned} z_I \nabla &= \int_{Obd} z L dA - \int_{cOa} z L dA = \int_{Obd} z L (z \tan(\alpha)) dz - \int_{cOa} z L (-z \tan(\alpha)) dz = \\ &= \tan(\alpha) \times \left(\int_{Obd} z^2 L dz + \int_{cOa} z^2 L dz \right) = \\ &= \tan(\alpha) \times \left(\int_{Obd} z^2 dA' + \int_{cOa} z^2 dA' \right) = \tan(\alpha) \times \int_{Linha\ de\ água} z^2 dA' = I_O \tan(\alpha) \end{aligned} \quad (5.13)$$

em que dA' é um elemento de área na secção horizontal do corpo tirada pela linha de água e I_O é o momento de inércia de área da mesma secção horizontal em relação a O (eixo dos xx). Tem-se, portanto:

$$z_I \times \Psi = I_O \tan(\alpha) \quad (5.14)$$

Como:

$$\frac{z_I}{\tan(\alpha)} = \overline{MC_I} \quad (5.15)$$

então:

$$\frac{I_O}{\Psi} = \overline{MC_I} = \overline{MC_G} + \overline{C_G C_I} \quad (5.16)$$

$$\overline{MC_G} = \frac{I_O}{\Psi} - \overline{C_G C_I} \quad (5.17)$$

o que permite calcular a altura metacêntrica analiticamente.

5.4. MOVIMENTO DE UM CORPO FLUTUANTE SOB A ACÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

5.4.1. REFERENCIAL

Nos subcapítulos seguintes irá utilizar-se um referencial como o representado na figura 5.6.

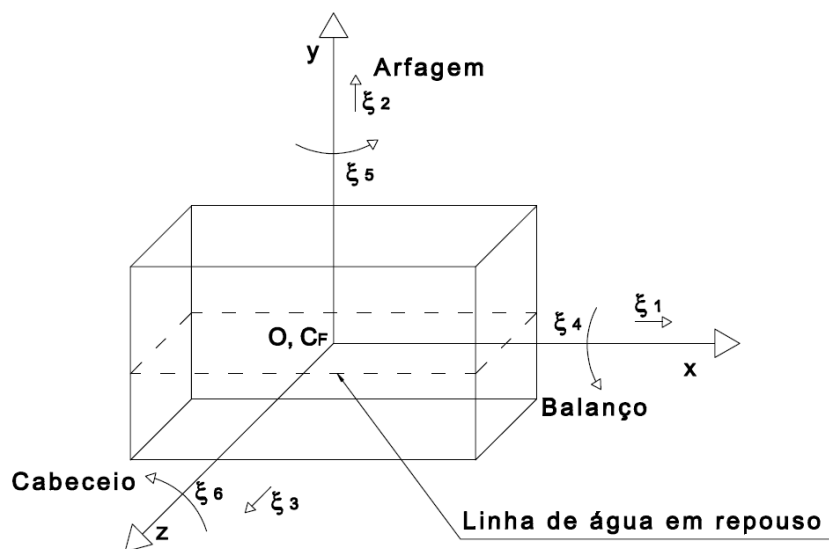


Fig.5.6 – Referencial para estudo de corpos flutuantes.

O eixo dos yy é vertical e os eixos dos xx e dos zz são horizontais. De uma forma geral, x estará alinhado segundo a direcção da maior dimensão do corpo. A origem das coordenadas estará no centro de flutuação, logo o plano xOz é coincidente com a superfície livre em repouso. No caso de um corpo como o representado na figura 5.6, com um plano de simetria vertical longitudinal, a origem das coordenadas estará no plano de simetria que será definido pelo plano xOy . Todas as indicações de posição do referencial em relação ao corpo são válidas apenas na posição inicial de repouso, pois este referencial não acompanha o corpo nos seus deslocamentos.

Há que ter em conta os seguintes aspectos relativos ao referencial. As equações do movimento de um corpo (por outras palavras, a 2ª lei de Newton) têm que ser escritas em relação a um referencial inercial, isto é, um referencial em relação ao qual, um corpo onde não actua nenhuma força, não tenha nenhuma aceleração. Dito de outro modo, um referencial que não tenha qualquer tipo de aceleração (seja ela relativa a qualquer tipo de movimento linear ou de rotação).

No entanto, as forças e momentos que actuam num corpo são, geralmente, expressas num referencial fixo no corpo que, por sofrer os mesmos movimentos que este (deslocamentos, acelerações, sejam elas lineares ou de rotação, etc.), não pode ser considerado, em geral, um referencial inercial. Isto torna necessária a transformação das equações de movimento para que estas sejam escritas em relação ao referencial fixo no corpo, obtendo-se as chamadas equações de Euler de movimento de um corpo rígido. Estas equações são não-lineares e complexas pelo que, por simplificação, são muitas vezes linearizadas. Esta linearização torna indiferente o estudo do corpo em relação a um referencial inercial, como o descrito no início deste ponto (que, na posição inicial de repouso, é coincidente com o referencial fixo no corpo), ou em relação a um referencial fixo no corpo, pois qualquer diferença entre os dois é perdida na linearização [55].

Outro aspecto a ter em conta é, como descrito anteriormente, o facto de as forças e momentos serem, geralmente, escritas num referencial fixo no corpo. Devido à existência de superfície livre, isso torna-se complicado, tendo que ser escritas em relação ao referencial indicado no início deste ponto, obviamente com um pequeno erro. No entanto, admitindo válida a Teoria Linear (ondas de pequena amplitude relativamente ao comprimento de onda) as amplitudes dos deslocamentos e movimentos do corpo também vão ser pequenas e a diferença entre estes dois referenciais é uma quantidade de segunda ordem que pode ser desprezada.

Note-se que as duas simplificações apresentadas não são equivalentes. A primeira diz respeito à forma como são escritas as equações de movimento e a segunda diz respeito à forma com são consideradas as forças e momentos que actuam no corpo.

Concluindo, adoptou-se, portanto, para a análise que se segue, um referencial inercial localizado na posição de repouso do corpo.

5.4.2. FORÇAS QUE ACTUAM SOBRE UM CORPO FLUTUANTE

5.4.2.1. Caso geral

Considere-se um corpo flutuante, livre, sem qualquer velocidade inicial, sob a acção de ondas regulares unidireccionais provenientes de uma orientação fazendo um ângulo α com o eixo dos xx , como as descritas pela Teoria Linear (amplitude pequena relativamente ao comprimento de onda e sobreposição admissível). Se o corpo for estável, como a amplitude das ondas é pequena, a amplitude dos movimentos do corpo (deslocamentos, velocidades, acelerações) também será pequena (à excepção dos casos em que ocorre ressonância) e será directamente proporcional à amplitude da onda

incidente. Os movimentos terão uma variação temporal igual à da onda incidente, ou seja, sinusoidal e com a mesma frequência, apenas com um ligeiro desfasamento. Neste caso, pode escrever-se [54]:

$$\phi = \phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_{Rj}(x, y, z, t) + A \phi_A(x, y, z, t) \right) e^{i\omega t} \right\} \quad (5.18)$$

em que ϕ é o potencial de velocidades, ξ_j é a amplitude complexa do deslocamento no grau de liberdade j , ϕ_{Rj} é um potencial de radiação devido a um movimento unitário forçado na direcção j , A é a amplitude da onda incidente e ϕ_A é um potencial relacionado com a existência de ondas incidentes e com a sua interacção com o corpo.

O potencial ϕ_A pode ser dividido na soma de dois potenciais: ϕ_I e ϕ_D . ϕ_I está relacionado com a onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo e ϕ_D representa a perturbação que o corpo induz na onda incidente.

Repare-se que a análise está a ser feita para o caso particular de um corpo sem velocidade inicial de translação em relação à Terra, quando poderia também ser feita para o caso geral de um corpo animado de uma determinada velocidade. Esta última situação, porém, não é previsível que ocorra em dispositivos de conversão de energia das ondas, pelo que não é considerada. A consideração da existência de velocidade inicial de translação levaria à correcção da frequência da onda incidente devido ao efeito de Doppler e à inserção de termos relativos a esta velocidade na expressão de potencial.

Introduzindo as condições fronteira adequadas (na superfície molhada do corpo, em profundidade infinita, ou no fundo do mar, em caso de profundidade finita, na superfície livre, a uma distância do corpo a tender para infinito e garantir que os potenciais satisfazem a equação de Laplace) e substituindo na equação de Bernoulli, obtém-se, desprezando os termos de ordem superior a um [54]:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + gy \right) = -\rho \text{Re} \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_{Rj} + A(\phi_D + \phi_I) \right) i\omega e^{i\omega t} \right\} - \rho gy \quad (5.19)$$

em que p é a pressão a actuar na superfície do corpo. Integrando (5.19) ao longo da superfície molhada do corpo obtém-se [54]:

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = -\rho \int_{S_c} \int \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} \left(gy + \text{Re} \sum_{j=1}^6 i\omega \xi_j e^{i\omega t} \phi_{Rj} + \text{Re} i\omega A e^{i\omega t} (\phi_I + \phi_D) \right) dS \quad (5.20)$$

em que F e M representam as componentes dos vectores da força e do momento resultantes sobre o corpo, n é um vector unitário normal à superfície molhada e orientado para o interior do corpo, r é o vector de posição e S_c indica que os integrais serão calculados ao longo da superfície molhada do corpo. A primeira parcela do integral representa as forças hidrostáticas, a segunda representa as forças devidas a efeitos de massas adicionais e de radiação e a terceira as forças devidas directamente às

ondas incidentes, proporcionais à sua amplitude. Cada uma das três parcelas será tratada em detalhe seguidamente.

5.4.2.2. Forças hidrostáticas

As forças e momentos hidrostáticos exercidas sobre um corpo podem ser obtidos pela seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = -\rho g \int_{S_c} \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} y dS \quad (5.21)$$

As forças hidrostáticas não são as únicas forças estáticas a que o corpo está sujeito, estando também sujeito à acção do peso. Por simplificação, como estas duas forças têm propriedades semelhantes, são, geralmente, consideradas em conjunto. Entrando com a contribuição do peso, admitindo que os deslocamentos do corpo são de pequena amplitude e desprezando quantidades de segunda ordem, as forças e momentos de natureza estática, para um corpo flutuante livre (estando ou não em equilíbrio estático) podem ser obtidas pelas seguintes expressões [54]:

$$F_2 = (\rho \nabla - m) g - C_{22} \xi_2 \quad (5.22)$$

$$M_4 = (m z_G - \rho \nabla z_I) g - C_{44} \xi_4 - C_{45} \xi_5 \quad (5.23)$$

$$M_6 = -(m x_G - \rho \nabla x_I) g - C_{65} \xi_5 - C_{66} \xi_6 \quad (5.24)$$

em que m representa a massa do corpo, x_G e z_G as coordenadas do centro de gravidade, x_I e z_I as coordenadas do centro de impulsão, ∇ o volume deslocado (não necessariamente com um peso igual ao do corpo, se o corpo não estiver em equilíbrio estático) e ξ_j , neste caso, representa o deslocamento do corpo na direcção do grau de liberdade j , em função do tempo e pode ser variável ou constante (note-se que anteriormente, e nas secções seguintes, ξ_j representa a amplitude do deslocamento). Neste caso, ξ_j não tem o significado de amplitude porque se está a tratar de uma condição estática e não de movimentos dinâmicos, ou oscilatórios, pelo que os deslocamentos não podem ser representados pela amplitude, apenas pelo seu valor num determinado instante.

Os coeficientes C_{22} a C_{66} são dados pelas seguintes expressões, válidas para pequenos deslocamentos em torno da posição inicial [54]:

$$C_{22} = \rho g S \quad (5.25)$$

$$C_{44} = \rho g S_{xx} + \rho g \nabla y_I - m g y_G \quad (5.26)$$

$$C_{45} = -g(\rho \nabla x_I - m x_G) \quad (5.27)$$

$$C_{65} = -g(\rho \nabla z_I - m z_G) \quad (5.28)$$

$$C_{66} = \rho g S_{zz} + \rho g \nabla y_I - m g y_G \quad (5.29)$$

em que S representa a área da secção horizontal do corpo pelo plano da superfície livre da água na posição inicial, S_{xx} é o momento de inércia de área da secção S em relação ao eixo dos xx e S_{zz} o momento de inércia de área da secção S em relação ao eixo dos zz . Note-se que os coeficientes nesta forma são válidos para um referencial localizado no centro de flutuação, em que o produto de inércia de área S_{xz} , da secção S em relação aos eixos dos xx e dos zz , é nulo. No caso de um corpo como o representado na figura 5.6, com um plano de simetria longitudinal e com um dos eixos horizontais (o eixo dos xx) localizado nesse plano, S_{xz} é sempre nulo. No caso de corpos em que o plano de simetria referido não existe, o referencial tem que ter os eixos horizontais orientados de maneira a que S_{xz} seja nulo, o que é sempre possível. Os coeficientes C_{ij} são designados por coeficientes de restituição e são iguais ao valor da força ou momento que actua na direcção do grau de liberdade i , devido a um deslocamento unitário na direcção do grau de liberdade j , sendo as forças ou momentos gerados designados por forças ou momentos de restituição. O seu efeito é semelhante à rigidez, K , de uma mola, num oscilador mecânico tradicional. Note-se também que não há forças geradas nos graus de liberdade 1, 3 e 5. Isto deve-se ao facto de as forças hidrostáticas horizontais terem sempre resultante nula (seja qual for o deslocamento em relação à posição inicial) e o momento 5 (em torno de um eixo vertical) não existir em situação hidrostática (mais uma vez, seja qual for o deslocamento em relação à posição inicial).

Se, para deslocamentos nulos, o corpo estiver em equilíbrio sob a acção das forças hidrostáticas e do peso, então, tendo em conta o que foi referido em 5.3, tem-se que $m = \rho \nabla$, $x_I = x_G$ e $z_I = z_G$ e as expressões (5.22) a (5.24) e os coeficientes (5.25) a (5.29) podem ser simplificados:

$$F_2 = -C_{22}\xi_2 \quad (5.30)$$

$$M_4 = -C_{44}\xi_4 \quad (5.31)$$

$$M_6 = -C_{66}\xi_6 \quad (5.32)$$

$$C_{22} = \rho g S \quad (5.33)$$

$$C_{44} = \rho \nabla g \left(\frac{S_{xx}}{\nabla} + y_I - y_G \right) \quad (5.34)$$

$$C_{66} = \rho \nabla g \left(\frac{S_{zz}}{\nabla} + y_I - y_G \right) \quad (5.35)$$

$$C_{45} = C_{65} = 0 \quad (5.36)$$

sendo válidos para pequenos deslocamentos em torno da posição de equilíbrio estático.

Atente-se nas expressões (5.30) a (5.32) e nos coeficientes (5.33) a (5.35). Nesta forma simplificada, a analogia com a rigidez de uma mola é mais evidente. No caso do coeficiente C_{22} verifica-se que origina uma força vertical, ascendente ou descendente, directamente proporcional à secção horizontal do corpo e ao seu deslocamento, mas de sentido oposto. Se o corpo está em equilíbrio e é ligeiramente afundado, gera-se um acréscimo de impulsão ($\rho g S \xi$) correspondente ao volume extra deslocado ($S \xi$) que força o corpo a voltar à posição inicial. Se, pelo contrário, o corpo é ligeiramente elevado, o volume total deslocado passa a ter um peso inferior ao do corpo e, portanto, parte do peso deixa de estar equilibrada, forçando o corpo a descer e, mais uma vez, voltar à posição inicial. Quando é aplicado ao corpo um deslocamento ou velocidade inicial e este é libertado em seguida, esta força gera um movimento oscilatório livre vertical, sinusoidal no tempo, designado por arfagem.

Para o caso dos coeficientes C_{44} e C_{66} , repare-se que, tendo em conta o referido em 5.3, o valor dentro de parêntesis é a altura metacêntrica (transversal no caso do coeficiente (5.34) e longitudinal no caso do coeficiente (5.35)) e o valor exterior a eles é a impulsão. Como, para pequenas inclinações (hipótese de base neste capítulo), se pode considerar que o seno do ângulo é aproximadamente igual ao próprio ângulo, a expressão (5.11), do binário gerado pelo peso e pela impulsão, pode escrever-se:

$$Bin = \rho g \nabla \overline{MC_G} \sin(\alpha) \approx \rho g \nabla \overline{MC_G} \alpha \quad (5.37)$$

Tendo em conta que os coeficientes C_{44} e C_{66} correspondem a $\rho g \nabla \overline{MC_G}$ e que ξ_j corresponde a α , o resultado de $-C_{44} \cdot \xi_4$ e $-C_{66} \cdot \xi_6$ são os binários gerados pelo peso e impulsão que, enquanto a altura metacêntrica for positiva, tendem a devolver o corpo à sua posição inicial. Este momento também origina um movimento oscilatório livre, designado por cabeceio ou balanço conforme o eixo de rotação, figura 5.6, sinusoidal no tempo, quando é aplicado ao corpo um deslocamento ou velocidade inicial e libertado em seguida.

5.4.2.3. Forças de radiação

A componente hidrodinâmica da força e do momento exercidos sobre um corpo flutuante, relacionada com os efeitos de radiação e massas adicionais, pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = -\rho \operatorname{Re} \sum_{j=1}^6 i \omega \xi_j e^{i \omega t} \int_{S_c} \int \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} \phi_{Rj} dS \quad (5.38)$$

em que ϕ_{Rj} é o potencial de radiação devido a movimentos oscilatórios forçados do corpo, na direcção do grau de liberdade j , em água em repouso. A expressão (5.38) pode também ser escrita da seguinte forma [54]:

$$F_i = \text{Re} \sum_{j=1}^6 \xi_j e^{i\omega t} f_{ij} \quad (5.39)$$

em que:

$$f_{ij} = \rho \int_{S_c} \frac{\partial \phi_{Ri}}{\partial n} \frac{\partial \phi_{Rj}}{\partial n} dS \quad (5.40)$$

A grandeza f_{ij} representa a amplitude complexa da força que actua na direcção i , devido a um movimento oscilatório forçado do corpo, em água em repouso, na direcção j . Esta quantidade pode ainda ser escrita da seguinte forma [54]:

$$f_{ij} = \omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij} \quad (5.41)$$

Tendo em conta que os deslocamentos são sinusoidais no tempo, pode escrever-se:

$$x_j = \text{Re}(\chi_j) = \text{Re}(\xi_j e^{i\omega t}) \quad (5.42)$$

em que x_j é o deslocamento na direcção do grau de liberdade j . Calculando a primeira e segunda derivadas obtêm-se, respectivamente, a velocidade e a aceleração:

$$\dot{x}_j = U_j = \text{Re}(\dot{\chi}_j) = \text{Re}(i\omega \xi_j e^{i\omega t}) \quad (5.43)$$

$$\ddot{x}_j = \dot{U}_j = \text{Re}(\ddot{\chi}_j) = \text{Re}(-\omega^2 \xi_j e^{i\omega t}) \quad (5.44)$$

Substituindo (5.41), (5.43) e (5.44) em (5.39) obtém-se:

$$F_i = \text{Re} \left(\sum_{j=1}^6 (\omega^2 a_{ij} - b_{ij}) \xi_j e^{i\omega t} \right) = - \sum_{j=1}^6 (a_{ij} \dot{U}_j + b_{ij} U_j) \quad (5.45)$$

O coeficiente a_{ij} , por estar relacionado com uma força que depende da aceleração do corpo, é designado por massa adicional. Representa a massa de fluido que o corpo tem que acelerar na direcção do grau de liberdade i , quando sofre uma aceleração unitária na direcção do grau de liberdade j .

O coeficiente b_{ij} , por estar relacionado com uma força que se opõe ao movimento, dependente da velocidade, representa uma forma de amortecimento, nomeadamente o amortecimento na direcção do grau de liberdade i , devido a uma velocidade unitária na direcção do grau de liberdade j . A existência desta forma de amortecimento faz com que o corpo, quando sujeito a um movimento oscilatório forçado na direcção de qualquer um dos seus graus de liberdade, em água em repouso, gere ondas radiantes que se afastam, retirando energia ao corpo, sendo por isso designado por amortecimento por radiação.

Considere-se um corpo com um grau de liberdade. A energia média dissipada pelo corpo, ao longo de um ciclo, devido ao amortecimento por radiação, pode ser calculada da seguinte forma:

$$-\overline{F_R U} = b \overline{U^2} = \frac{1}{2} b \omega^2 |\xi|^2 \quad (5.46)$$

Para que o resultado desta expressão corresponda a uma energia efectivamente dissipada, b tem que ser maior ou igual a zero (maior na generalidade dos casos; igual a zero no caso de corpos com geometrias especiais que não irradiem ondas). No caso de b ser menor do que zero, a energia dissipada seria negativa (ganho de energia), ou seja, o corpo, no seu movimento, retiraria energia da água em repouso, o que, naturalmente, não é possível.

As massas adicionais e os coeficientes de amortecimento são independentes da altura da onda incidente, mas dependem da frequência do movimento. O seu cálculo analítico só é possível para geometrias extremamente simples. Para a maior parte dos casos, estes coeficientes têm que ser determinados em ensaios ou recorrendo a métodos numéricos. No caso geral, de um corpo com seis graus de liberdade, a_{ij} e b_{ij} formam uma matriz 6×6 simétrica, ou seja, com apenas 21 valores diferentes entre si. À medida que forem sendo impostas simetrias ao corpo, o número de valores diferentes vai-se reduzindo.

5.4.2.4. Forças de excitação

A força devida à existência de agitação regular pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = -\rho \operatorname{Re} i \omega A e^{i \omega t} \int_{S_c} \int \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} (\phi_I + \phi_D) dS \quad (5.47)$$

O potencial ϕ_I é o potencial da onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo flutuante. Este potencial pode ser avaliado, por exemplo, pela expressão (2.18). O potencial ϕ_D representa os efeitos que o corpo induz na onda incidente, ou seja, a difracção. Os efeitos são tanto mais intensos quanto maior for a razão entre a largura do corpo, na direcção paralela à crista das ondas, e o comprimento de onda. A determinação deste potencial depende da geometria do corpo estudado.

A expressão (5.47) também pode ser escrita da seguinte forma [54]:

$$F_i = \text{Re} \left(A e^{i\omega t} X_i \right) \quad (5.48)$$

em que:

$$X_i = -\rho \int \int_{S_c} (\phi_I + \phi_D) \frac{\partial \phi_{Ri}}{\partial n} dS \quad (5.49)$$

A grandeza X_i representa a amplitude complexa da força ou momento na direcção i , devido a uma onda incidente de amplitude unitária. A força devida aos efeitos das ondas incidentes e das ondas difractadas tem o nome de força de excitação por, naturalmente, provocar a excitação do corpo. A menos de efeitos de segunda ordem, que se podem considerar desprezáveis, a força de excitação não depende do estado de movimento de um corpo, pelo que, pode ser calculada com este fixo, amarrado, ou a flutuar livremente, imóvel ou em movimento. Geralmente são determinadas com o corpo na posição de repouso. Tomando como aproximação que a onda incidente é longa, quando comparada com as dimensões do corpo, pode admitir-se que o campo de velocidades induzido pela onda é constante ao longo do contorno do corpo. Além disso, se L for grande, k (número de onda) será pequeno e, então, as derivadas de ϕ_I , proporcionais a k , serão desprezáveis. Nestas condições, pode demonstrar-se, [54], que:

$$F_2 \approx \rho g S \eta(t) \quad (5.50)$$

$$M_4 \approx -S_x \rho g \eta(t) \quad (5.51)$$

$$M_6 \approx S_z \rho g \eta(t) \quad (5.52)$$

em que S_i representa o momento estático da superfície que resulta do seccionamento do corpo pela superfície livre da onda, figura 5.7, em relação ao eixo dos i e S tal como em situação hidrostática.

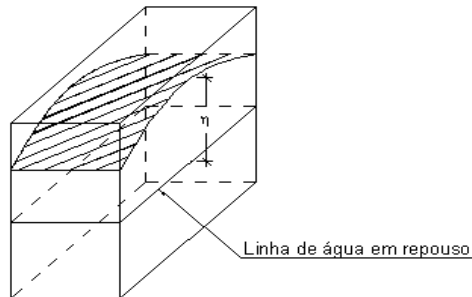


Fig.5.7 – Seccionamento do corpo pela superfície livre de uma onda.

Como se pode ver, nesta análise simplificada, a força resultante da existência de agitação não é mais do que o acréscimo, ou decréscimo, de impulsão, como resultado da existência, respectivamente, de uma maior porção do corpo submersa, quando passa a crista, ou de uma maior porção do corpo emersa, quando passa a cava, relativamente ao nível da água em repouso, figura 5.8. Por outro lado, o momento é resultante do facto de o corpo estar sujeito, simultaneamente, a diferentes alturas de água ao longo do seu contorno e, logo, a uma força de impulsão variável. Em qualquer dos casos considera-se que a pressão da água varia linearmente com a profundidade o que, tendo em conta o que foi explicado em 2.2.6., não corresponde propriamente à realidade.

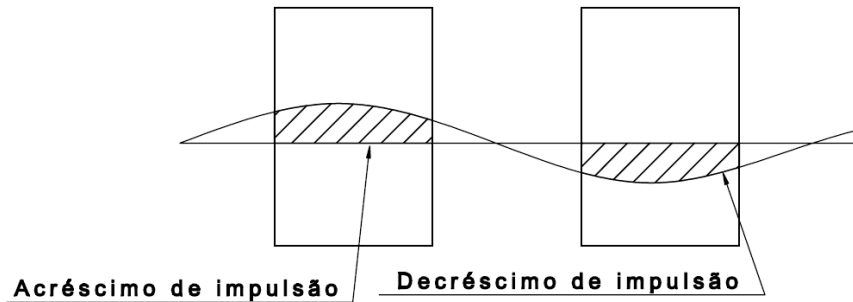


Fig.5.8 – Variação da impulsão ao longo de um corpo com a passagem de uma onda.

Como a elevação da superfície livre num determinado ponto varia no tempo (variação sinusoidal), as forças e os momentos, vão também variar no tempo, com a mesma frequência e com a mesma fase.

5.4.3. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Pela segunda lei de Newton, a resultante de forças exercidas sobre um corpo é dada por:

$$F = m \ddot{x} \quad (5.53)$$

No caso de um sistema com seis graus de liberdade, a equação (5.53) toma a forma matricial:

$$F_i = \sum_{j=1}^6 M_{ij} \ddot{x}_j \quad (5.54)$$

em que M_{ij} representa os termos da matriz de inércia generalizada, que relacionam a força gerada na direcção do grau de liberdade i , com a aceleração na direcção do grau de liberdade j . Para o caso de um corpo a flutuar livremente na superfície livre da água, em equilíbrio estático quando a água está em repouso, a expressão (5.54) é escrita da seguinte forma:

$$F_i = \sum_{j=1}^6 M_{ij} \dot{U}_j \quad (5.55)$$

em que \ddot{U}_j representa a aceleração na direcção do grau de liberdade j , definida como na expressão (5.44). Para este caso, pode demonstrar-se, [54], que a matriz de inércia generalizada (quando considerada a linearização das equações de Euler referida em 5.4.1.) toma a seguinte forma:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & -m y_G \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & m y_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m y_G & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ -m y_G & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

em que m representa a massa do corpo, y_G a coordenada y do centro de gravidade, I_{ij} , o produto de inércia de massa do corpo em relação aos eixos i e j e I_{ii} o momento de inércia de massa do corpo em relação ao eixo i .

A aceleração de um corpo, em notação complexa, toma a seguinte forma (expressão (5.9)):

$$\ddot{\chi}_j = -\omega^2 \xi_j e^{i\omega t} \quad (5.57)$$

e, a segunda equação de Newton toma a forma:

$$\operatorname{Re} \left(\sum_{j=1}^6 -\omega^2 \xi_j e^{i\omega t} \right) M_{ij} = F_i \quad (5.58)$$

Substituindo em F_i , na expressão (5.58), os valores das forças determinados anteriormente obtém-se:

$$\sum_{j=1}^6 -M_{ij} \omega^2 \xi_j e^{i\omega t} = -\sum_{j=1}^6 C_{ij} \xi_j e^{i\omega t} + \sum_{j=1}^6 (\omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij}) \xi_j e^{i\omega t} + A X_i e^{i\omega t} \quad (5.59)$$

Reescrevendo a expressão (5.59) obtém-se:

$$\sum_{j=1}^6 (-\omega^2 \xi_j e^{i\omega t} (a_{ij} + M_{ij}) + i\omega \xi_j e^{i\omega t} b_{ij} + \xi_j e^{i\omega t} C_{ij}) = A X_i e^{i\omega t} \quad (5.60)$$

ou, de outra forma:

$$\sum_{j=1}^6 \left((a_{ij} + M_{ij}) \ddot{x}_j(t) + b_{ij} \dot{x}_j(t) + C_{ij} x_j(t) \right) = \text{Re} \left(A X_i e^{i\omega t} \right) \quad (5.61)$$

Da expressão (5.61) torna-se evidente o carácter oscilatório do sistema, se se observar que esta expressão é semelhante à que rege o comportamento dos osciladores mecânicos tradicionais, sujeitos a forças exteriores de variação temporal sinusoidal: tem-se, no primeiro membro, termos de massas, a_{ij} e M_{ij} , associados à aceleração, termos de amortecimento, b_{ij} , associados à velocidade, e termos de rigidez, C_{ij} , associados ao deslocamento e, no segundo membro, a força exterior que excita o sistema. A resolução da expressão (5.61), desde que sejam conhecidos os valores das massas adicionais, dos coeficientes de amortecimento e das forças de excitação, permite conhecer o comportamento do sistema. No caso da aplicabilidade da Teoria Linear, hipótese admitida na obtenção destes resultados, os movimentos do corpo serão sinusoidais no tempo.

A analogia feita com um oscilador mecânico tradicional não é, no entanto, absoluta. O amortecimento e as massas adicionais variam com a frequência, pelo que as características do sistema não são constantes, como no caso dos osciladores mecânicos típicos. Além disso, o corpo, no seu movimento, gera ondas que induzem perturbações no fluido onde este se encontra, o que não tem qualquer correspondência no caso dos osciladores mecânicos. Uma característica comum é a ocorrência de ressonância, quando a frequência de excitação é próxima da frequência de vibração natural do corpo. Para um corpo flutuante livre, nos graus de liberdade em que os movimentos oscilatórios livres são possíveis (arfagem, balanço e cabeceio, já que os restantes graus de liberdade não têm forças de restituição e, por isso, não apresentam movimentos oscilatórios, a não ser forçados) as frequências de vibração natural podem ser calculadas em aproximação (desprezando o amortecimento e considerando que os movimentos num determinado grau de liberdade são independentes dos movimentos nos restantes graus) pelas seguintes expressões ([54], [53]):

$$\omega_2 = \left(\frac{C_{22}}{a_{22} + M_{22}} \right) = \left(\frac{\rho g S}{a_{22} + m} \right) \quad (5.62)$$

$$\omega_4 = \left(\frac{C_{44}}{a_{44} + M_{44}} \right) = \left(\frac{\rho \nabla g \left(\frac{S_{xx}}{\nabla} + y_I - y_G \right)}{a_{44} + I_{xx}} \right) \quad (5.63)$$

$$\omega_6 = \left(\frac{C_{66}}{a_{66} + M_{66}} \right) = \left(\frac{\rho \nabla g \left(\frac{S_{zz}}{\nabla} + y_I - y_G \right)}{a_{66} + I_{zz}} \right) \quad (5.64)$$

À medida que a frequência de excitação se aproxima da frequência de vibração natural, a amplitude dos movimentos torna-se cada vez maior, figura 5.9. Uma medida dos efeitos de ressonância conseguidos pode ser obtida pelos seguintes coeficientes:

$$\frac{\xi_j}{A} \quad (5.65)$$

$$\frac{\xi_j}{A'} \quad (5.66)$$

que representam a razão entre a amplitude do deslocamento e a amplitude da onda incidente, para um movimento vertical, e a razão entre a amplitude da rotação e o máximo declive da superfície da onda, A' , para movimentos de rotação em torno de eixos horizontais. Estes parâmetros, ou outros equivalentes que procurem traduzir a relação entre os movimentos do corpo e a excitação, são designados factores de amplificação dinâmica. Naturalmente, quanto maior for o amortecimento, menor será o factor de amplificação dinâmica dos movimentos.

Para valores muito reduzidos da frequência de excitação, o corpo limita-se a acompanhar a onda, sendo o deslocamento máximo vertical praticamente igual à amplitude da onda e a rotação máxima praticamente igual a zero (o parâmetro (5.65) tende para um e o parâmetro (5.66) tende para zero). Isto percebe-se facilmente se se reparar que, para frequências muito reduzidas, os níveis variam muito lentamente e os seus efeitos podem ser comparados, por exemplo, aos da variação do nível do mar por acção de uma maré (cujos efeitos na excitação do corpo serão reduzidos). Para frequências muito elevadas as forças de excitação tendem para zero e o corpo fica praticamente imóvel (os parâmetros (5.65) e (5.66) tendem para zero). Isto percebe-se facilmente se se reparar que, para frequências muito elevadas, o corpo fica simultaneamente sujeito à acção de várias cristas e várias cavas, cujos efeitos se anulam. Na figura 5.9 está esquematizada a curva do factor de amplificação dinâmica em função da frequência de onda incidente, para um movimento de oscilação vertical.

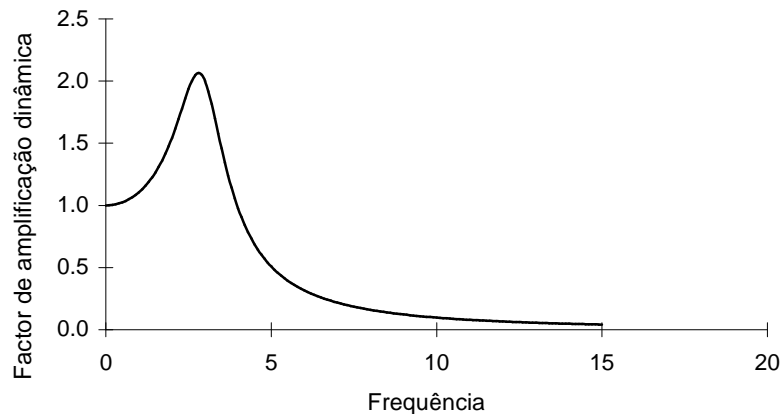


Fig.5.9 – Factor de amplificação dinâmica vertical em função da frequência de excitação.

As equações do movimento aqui apresentadas foram deduzidas para o caso mais simples de um corpo livre. No caso de o corpo estar sujeito a outras acções, como, por exemplo, amarrações, o seu efeito pode ser facilmente introduzido acrescentando-se nas expressões os coeficientes adequados aos efeitos gerados.

5.4.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A existência de amortecimento por radiação provoca a formação de ondas que irradiam do corpo, causando perturbações no fluido. Ao existirem perturbações no fluido geram-se também perturbações nas forças que este exerce sobre o corpo o que, naturalmente, vai influenciar os seus movimentos. As ondas formadas vão-se propagando, ao longo do tempo, para novas zonas do domínio fluido, aumentando a extensão perturbada. Como a extensão perturbada varia no tempo, os movimentos do corpo passam a depender do historial do fluido. Os efeitos do historial, ou de memória, são tidos em conta, admitindo que a linearização é válida, através do cálculo do seguinte integral de convolução:

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^6 \int_{-\infty}^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}(\tau) d\tau \quad (5.67)$$

em que $F_i(t)$ representa a força ou momento na direcção do grau de liberdade i , no instante t , K_{ij} uma função que representa os efeitos, no grau de liberdade i , no instante t , do amortecimento no grau de liberdade j devido a uma velocidade $\dot{x}(\tau)$ no grau de liberdade j , no instante τ . Este tipo de análise não se aplica exclusivamente aos efeitos de radiação, sendo válida sempre que se pretenda determinar o comportamento do corpo, em função do tempo, quando as acções que actuam sobre ele são também função do tempo.

5.4.5. MOVIMENTOS SOB A ACÇÃO DE AGITAÇÃO IRREGULAR

A situação real de solicitação de um corpo corresponde a estados de agitação irregular e não à situação regular descrita anteriormente. Esta diferença, no entanto, não introduz uma grande dificuldade no estudo do comportamento do corpo. Tenha-se em conta o seguinte:

- o sistema de equações a resolver é linear e, portanto, a sobreposição de soluções é admissível;
- sendo aplicável a Teoria Linear, um estado de agitação irregular corresponde à sobreposição de vários estados de agitação regular;
- a agitação apenas interfere directamente na componente da força de excitação.

As soluções do problema obtêm-se resolvendo o sistema para as forças de excitação das diversas componentes do espectro de agitação irregular em causa, sobrepondo depois as diversas soluções para obter o movimento do corpo nesse estado de agitação. A resolução tem que ser feita para cada componente individual (e não para o somatório) porque os coeficientes de amortecimento e as massas adicionais variam com a frequência do movimento (igual à da força de excitação) e, logo, tem que ser resolvida cada equação com os coeficientes correspondentes à frequência de excitação.

5.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA E LARGURA DE CAPTURA

Considere-se um corpo flutuante de massa m , secção horizontal S , com apenas um grau de liberdade (movimento vertical), em águas profundas, sujeito a agitação regular de amplitude A . A equação do movimento será a seguinte:

$$(M_{22} + a_{22}) \ddot{x}(t) + b_{22} \dot{x}(t) + C_{22} x(t) = \text{Re}(AX_2 e^{i\omega t}) \quad (5.68)$$

Tendo em conta o coeficiente (5.33) e a matriz de inércia generalizada (5.56) tem-se que $C_{22} = \rho g S$ e $M_{22} = m$ e, então, pode escrever-se:

$$(m + a_{22}) \ddot{x}(t) + b_{22} \dot{x}(t) + \rho g S x(t) = \text{Re}(AX_2 e^{i\omega t}) \quad (5.69)$$

Considere-se agora que é instalado um sistema de conversão de energia no corpo, composto por uma mola de rigidez K , associado ao deslocamento do corpo, e um amortecedor (ligado a sistemas de recolha de energia) de coeficiente de amortecimento C , associado à velocidade, ambos de comportamento linear, figura 5.10.

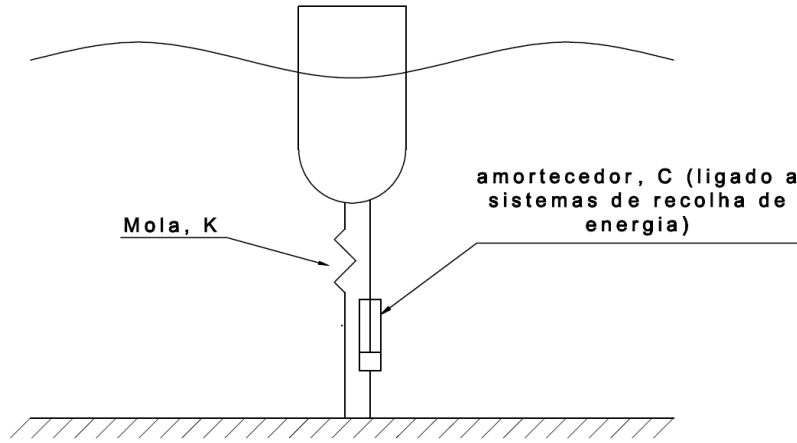


Fig.5.10 – Esquema de um sistema genérico de conversão de energia das ondas.

Como o sistema se destina à recolha de energia, C tem que ser maior do que zero para que, tal como explicado em 5.4.2.3., haja efectivamente recolha de energia do corpo. A equação do movimento tem que ser actualizada, tal como referido em 5.4.3., para contar com os efeitos do sistema de conversão de energia:

$$(m + a_{22}) \ddot{x}(t) + (b_{22} + C) \dot{x}(t) + (\rho g S + K) x(t) = \text{Re}(AX_2 e^{i\omega t}) \quad (5.70)$$

A razão LC, entre a potência média capturada pelo sistema, \bar{P}_{disp} , e a potência média por unidade de largura da onda incidente, \bar{P}_{onda} , é designada por largura de captura:

$$LC = \frac{\bar{P}_{\text{disp}}}{\bar{P}_{\text{onda}}} \quad (5.71)$$

Tendo em conta que \bar{P}_{onda} é um valor unitário de potência, LC pode ser entendido como a largura da onda incidente que tem tanta potência quanto a desenvolvida pelo sistema de conversão, daí o nome de largura de captura.

Substituindo em (5.70) as expressões (5.42), (5.43) e (5.44) e resolvendo em relação a ξ obtém-se:

$$\xi = \frac{AX_2}{-\omega^2(m + a_{22}) + i\omega(b_{22} + C) + \rho gS + K} \quad (5.72)$$

Demonstra-se, [56], que a potência média desenvolvida pelo sistema de conversão é igual a :

$$\bar{P}_{\text{disp}} = \frac{1}{2} C \omega^2 |\xi|^2 = \frac{1}{2} C |U_0|^2 \quad (5.73)$$

considerando que:

$$U = \text{Re}(i\omega\xi e^{i\omega t}) = \text{Re}(U_0 e^{i\omega t}) \quad (5.74)$$

Demonstra-se também, [56], que a potência média exercida pela onda incidente sobre o corpo é igual a:

$$\bar{P}_{\text{exercida}} = \frac{1}{8b_{22}} |AX_2|^2 - \frac{b_{22}}{2} \left| U_0 - \frac{AX_2}{2b_{22}} \right| \quad (5.75)$$

Como o corpo, em média, não poderá armazenar energia, então terá que ser:

$$\bar{P}_{\text{disp}} = \bar{P}_{\text{exercida}} \quad (5.76)$$

A potência média recolhida será máxima, [56], quando:

$$U_0 = \frac{AX_2}{2b_{22}} \quad (5.77)$$

Tendo em conta que $b_{22} > 0$ verifica-se que, para que a potência seja máxima, a velocidade deverá estar em fase com a força de excitação (e não com a força hidrodinâmica total). Substituindo (5.77) em (5.75) obtém-se:

$$\bar{P}_{máx.disp} = \frac{1}{8b_{22}} |AX_2|^2 \quad (5.78)$$

Para um corpo com um eixo de simetria vertical, oscilando verticalmente, com um grau de liberdade pode demonstrar-se, [56], que:

$$X_2 = \left(\frac{2g^3 \rho b_{22}}{\omega^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.79)$$

Substituindo (5.79) em (5.78) obtém-se:

$$\bar{P}_{máx.disp} = \frac{g^3 \rho A^2}{4\omega^3} \quad (5.80)$$

Considere-se a expressão (2.58), potência por unidade de largura de uma onda em águas profundas, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{P}_{onda} = \bar{E} C_g = \frac{\rho g H^2}{8} \times \frac{1}{2} \times \frac{gT}{2\pi} = \frac{\rho g H^2}{16} \times \frac{g}{\omega} = \frac{4\rho g^2 A^2}{16\omega} = \frac{\rho g^2 A^2}{4\omega} \quad (5.81)$$

Substituindo o resultado (5.81) em (5.80) obtém-se:

$$\bar{P}_{máx.disp} = \frac{\bar{P}_{onda} \times g}{\omega^2} = \frac{\bar{P}_{onda} \times g \times T}{\omega \times 2\pi} = \frac{\bar{P}_{onda} C_0}{\omega} = \frac{\bar{P}_{onda} \times \omega}{\omega \times k} = \frac{\bar{P}_{onda}}{k} \quad (5.82)$$

que, reescrevendo, origina:

$$\frac{\bar{P}_{máx.disp}}{\bar{P}_{onda}} = \frac{1}{k} = \frac{L}{2\pi} \quad (5.83)$$

Tendo em conta a expressão (5.71), obtém-se:

$$\frac{\bar{P}_{máx.disp}}{\bar{P}_{onda}} = LC = \frac{L}{2\pi} \quad (5.84)$$

válida para dispositivos com um grau de liberdade vertical e simétricos em relação a um eixo também vertical. Verifica-se que, para este tipo de dispositivo (PA), a largura de captura não depende das suas dimensões, nem da sua geometria. Sabendo que um PA tem dimensões menores do que o comprimento de onda, em princípio é possível recolher energia numa largura de onda maior do que a largura do corpo flutuante, o que constitui a característica fundamental dos PA, salientada em 3.3.3.1.

6

TRABALHO EXPERIMENTAL

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrita toda a informação relativa ao trabalho experimental: características do modelo, da instalação experimental, descrição dos ensaios executados, resultados obtidos, etc. Será também, sempre que necessário, feita uma breve exposição teórica de algum conceito que seja fundamental para a compreensão de algum ensaio ou análise/tratamento de algum resultado e que não se enquadraria noutro capítulo.

O principal objectivo deste capítulo será a determinação e apresentação das características dinâmicas do corpo em estudo: frequências de oscilação natural, amortecimento e comportamento do corpo livre sob efeito de agitação regular, com diferentes frequências, nos dois graus de liberdade estudados (arfagem e cabeceio).

6.2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

6.2.1. O TANQUE DE ONDAS

O tanque de ondas da FEUP tem 28 m de comprimento, 12 de largura e 1 de profundidade, figura 6.1. Para absorção de ondas e controlo de reflexões, está dotado de uma praia de cascalho na extremidade de sotamar.



Fig.6.1 – Tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP.

6.2.2. O SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS

O sistema de geração de ondas é constituído por batedores do tipo pistão, de 0,75 m de largura cada, accionados por servo-motores eléctricos. Existe um total de dezasseis batedores, perfazendo uma frente de 12 m, agrupados em dois módulos de oito batedores. O movimento de cada batedor é independente do dos restantes, o que permite uma elevada flexibilidade no seu funcionamento: geração de ondas com apenas uma direcção ou com várias direcções, funcionamento em serpente, ou de apenas determinados batedores, etc. O sistema pode funcionar em profundidades até cerca de 1 m e gerar ondas com frequências e alturas variáveis em função da profundidade da água, da capacidade de geração dos batedores e do limite físico de rebentação. A operação do sistema é feita através de um sub-sistema próprio existente na sala de controlo, localizada na extremidade de barlar do tanque.

6.2.3. A SONDA DE NÍVEL

A sonda de nível é constituída por um par de condutores de aço, muito finos, fixo num tripé e parcialmente submerso no tanque, figura 6.2. Entre os dois condutores circula uma ligeira corrente eléctrica, cuja diferença de potencial varia linearmente com o nível instantâneo de água. A diferença de potencial é medida num sistema existente na sala de controlo e a sua leitura é transformada em altura de onda através do software de controlo das sondas. As leituras das sondas são feitas por amostragem discreta do nível instantâneo de água, com uma determinada frequência, definida pelo utilizador. Antes da sua utilização, as sondas têm que ser adequadamente calibradas.



Fig.6.2 – Sonda de nível.

6.2.4. O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE MOVIMENTOS

O sistema de aquisição de movimentos é constituído por três de câmaras infra-vermelhos (IV), figura 6.3, e respectivos suportes, e cinco reflectores de infra-vermelhos, esféricos, de 30 mm de diâmetro. Os reflectores são colocados no corpo a estudar e as câmaras são dispostas de modo a captarem os reflectores e a fazerem determinados ângulos entre si e com o corpo a estudar, que variam conforme a

natureza do estudo e condições locais. Durante uma medição, as câmaras emitem *flashes* infravermelhos, com uma determinada frequência, definida pelo utilizador, e captam as suas reflexões nos reflectores.



Fig.6.3 – Câmara do sistema de aquisição de movimentos.

A operação do sistema é efectuada através de um computador dedicado, localizado na sala de comandos. Após a calibração do sistema, o software de controlo determina a posição relativa entre as três câmaras e, com esses dados, por triangulação, é possível determinar os movimentos dos reflectores (posição, velocidade e aceleração) em cada instante.

É possível também utilizar os reflectores para definir um corpo rígido. Nesse caso, a análise dos dados recolhidos passa a ser mais abrangente: em vez de apenas se obterem dados de pontos no espaço, é possível, através da variação da posição dos reflectores, determinar os três tipos de movimentos lineares e os três tipos de movimentos de rotação do corpo. Há necessidade de definir um referencial global, em relação ao qual são determinados os movimentos do corpo, e um referencial fixo em relação ao corpo, utilizado para determinar os movimentos do corpo em relação ao referencial global. Para este tipo de análise é fundamental cumprir os seguintes requisitos [57]:

- os reflectores utilizados para definir o corpo rígido têm que ser pelo menos quatro e pelo menos um tem que estar num plano vertical diferente do dos restantes, de modo a que o sistema consiga proceder adequadamente à definição do referencial local, isto é, da posição do corpo;
- os reflectores têm que manter as suas posições relativas ao longo do tempo, para que não se alterem as características de referenciação do corpo;
- não deve haver mais do que um plano de simetria vertical, para que o software consiga detectar adequadamente a orientação do corpo.

Estas últimas informações, embora fora do âmbito da simples descrição do equipamento, são fundamentais para a definição do sistema de reflectores, a ver mais adiante.

6.3. O MODELO

6.3.1. A BÓIA

O corpo a estudar é um modelo de um sistema de conversão de energia das ondas desenvolvido pelo IST, cujo princípio de funcionamento deverá ser semelhante ao dos sistemas *Aquabuoy* e *Sloped IPS Buoy*, apresentados em 3.3.3.3 e 3.3.3.5, respectivamente. As características fundamentais deste dispositivo ainda não estão completamente definidas, pelo que o modelo em estudo não é uma representação à escala de nenhum protótipo. É sim, algo de que se pretende retirar informação para a continuação do desenvolvimento do dispositivo.

As características físicas teóricas do modelo e dos ensaios foram previamente determinadas pela equipa do IST e são apresentadas no anexo A1. Houve, no entanto, algumas dificuldades práticas na construção do modelo inicialmente previsto, que impediram a reprodução das características exactamente como o desejado. Pretendia-se que a calote esférica fosse amovível, de preferência com rosca, para que fosse possível alterar o valor e a posição da massa concentrada existente no interior do modelo. Esta característica era, contudo, de difícil execução, pelo que teve que ser encomendada a sua realização ao Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI-FEUP). O INEGI, por sua vez, na altura em que o pedido foi feito, apenas teria possibilidade de trabalhar em resina *epoxy*, pelo que a calote esférica e o anel onde ela enrosca, figura 6.4, tiveram que ser realizadas neste material. Isto teve como consequência a utilização de um material com densidade diferente da do material inicialmente previsto, acrílico. Além disso, a zona da rosca, para que a sua construção fosse possível, teve que ser executada com uma espessura de 10,625 mm, diferente do previsto.

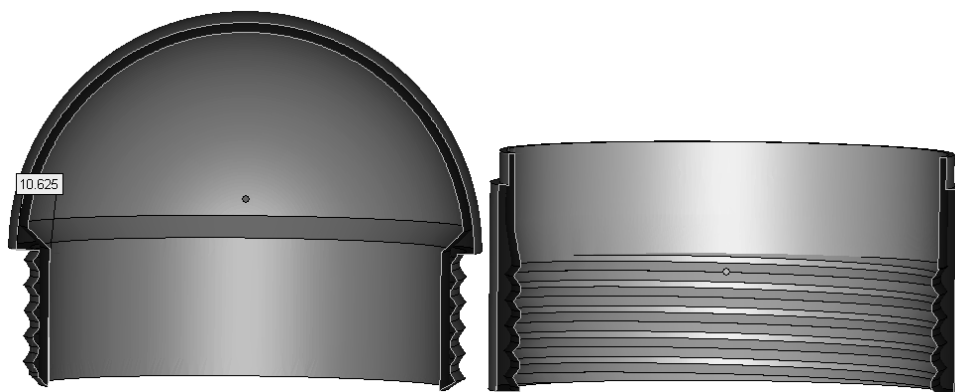


Fig.6.4 – Corte da calote esférica e do anel da rosca, desenvolvido pelo INEGI-FEUP.

Outra dificuldade foi a obtenção de um cilindro de acrílico, para a parte superior do modelo, com a espessura desejada (a altura não era problema, pois um cilindro com altura maior do que a desejada poderia ser facilmente cortado para a dimensão pretendida). O mais próximo possível que se conseguiu obter foi um cilindro de 149,5 mm de diâmetro (pode considerar-se igual aos 150 mm desejados, pois a diferença é irrelevante) com 3 mm de espessura, outra vez diferente do desejado, 5 mm. O cilindro de acrílico teve de ser cortado até ter a altura de 160 mm, de modo a que, após a colagem do anel de fixação da calote, o corpo cilíndrico ficasse com a altura de 225 mm, desejada.

O facto de se utilizarem materiais com espessuras e/ou densidades diferentes do previsto, apesar de não ser o ideal, não levanta grandes problemas. Desde que a forma do casco, por razões hidrodinâmicas, se mantenha (o que acontece) e as diferenças não sejam grosseiras, as ligeiras

diferenças na massa do casco podem ser compensadas, alterando-se o valor da massa concentrada existente no fundo do corpo.

Na construção do modelo, tendo em conta o referido acima, a massa concentrada no fundo foi determinada de modo a garantir o calado previsto inicialmente, igual a 150 mm.

Nos esquemas enviados, o modelo é apresentado sem sistema de reflectores, pelo que a calibração da massa concentrada foi executada sem considerar esta estrutura. A existência do sistema de reflectores acrescenta cerca de 50 g ao modelo, que se traduzem em cerca de 3 mm de calado extra em relação ao previsto. A massa concentrada foi realizada em esferas de chumbo, de 1 a 2 mm de diâmetro, com uma baridade de $6553,85 \text{ kg/m}^3$. Por ser móvel, foi necessário um sistema para a fixar.

Em resumo, o modelo é constituído por um cilindro superior de acrílico, na base do qual está colado um anel de resina epoxy, no qual enrosca a calote esférica que, por sua vez, aloja a massa concentrada, figura 6.5. As características físicas da bóia são apresentadas na tabela 6.1.

Face aos problemas descritos em relação à construção do modelo, pode pôr-se a questão de qual a razão para não se ter construído o modelo em acrílico, de raiz, por encomenda? A resposta está no facto de, na FEUP, não haver pessoal qualificado para o construir e porque a sua encomenda a entidades exteriores teria um preço excessivo.

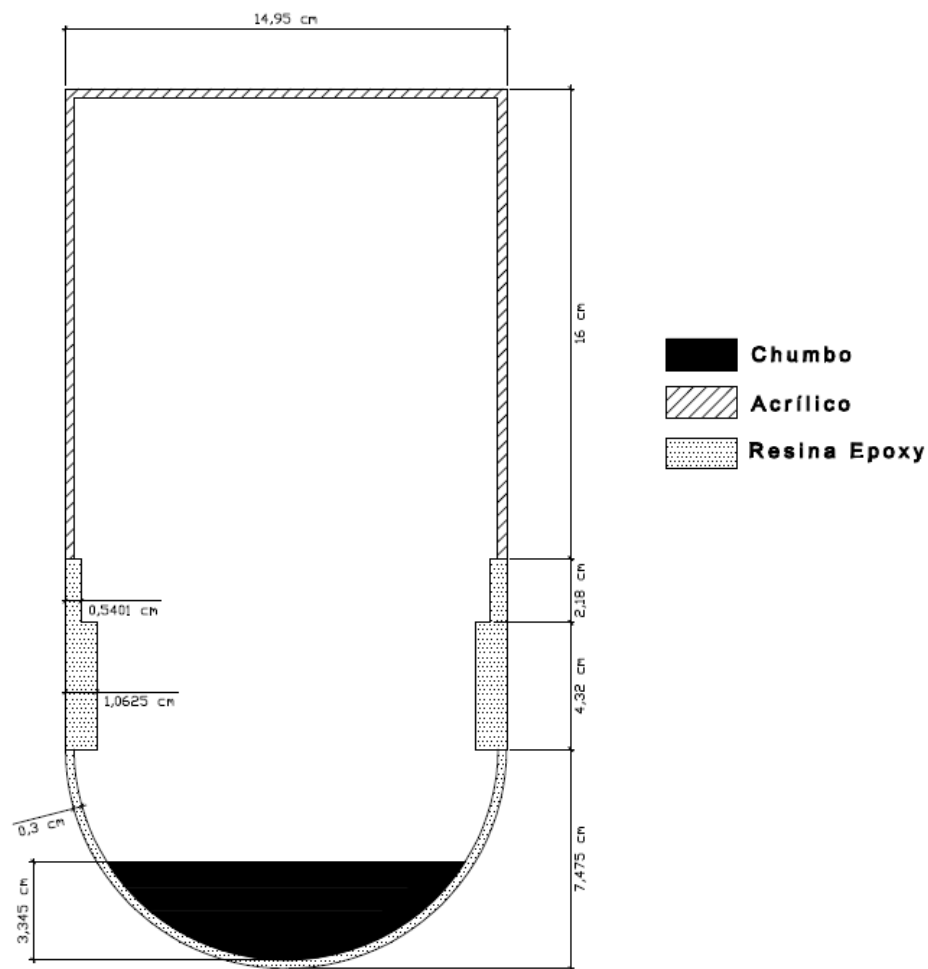


Fig.6.5 – Esquema final do modelo estudado.

Tabela 6.1 – Características de massa e inércia do modelo estudado.

Peça	Massa (kg)	Inércia centro de flutuação x (kg.m ²)	Inércia centro de flutuação z (kg.m ²)
Disco de acrílico	0,0624	0,001463	0,001463
Cilindro de acrílico	0,2569	0,002423	0,002423
Anel de epoxy superior	0,2312	0,001258	0,001258
Anel de epoxy inferior	0,0624	0,0001922	0,0001922
Calote esférica	0,1173	0,001080	0,001080
Sistema de fixação da massa	0,0937	0,0009896	0,0009896
Chumbo	1,3960	0,02279	0,02279
Total	2,2200	0,03020	0,03020

6.3.2. O SISTEMA DE REFLECTORES

O sistema de reflectores foi construído em hastes de madeira de balsa, de 54 g/m com 1,5 cm de lado e com reflectores infra-vermelhos de 30 mm de diâmetro e 3 g de massa. O sistema tem o aspecto e as dimensões representadas nas figuras 6.6 e 6.7. Como se pode ver, há um reflector situado a um nível vertical diferente dos restantes e, no plano horizontal, um reflector situado a meio de uma haste e não na extremidade. Isto deve-se ao facto, explicado em 6.2.4.3., do sistema de aquisição de movimentos requerer pelo menos quatro reflectores, com pelo menos 1 situado num nível vertical diferente dos restantes e que não haja mais do que um plano de simetria vertical.

Existem cinco reflectores no total, apesar de, teoricamente, apenas serem necessários quatro. O quinto reflector foi colocado por questões de redundância: durante o movimento do corpo, um dos reflectores poderá ficar obstruído, pelas hastes, por outros reflectores, ou sair do campo de visão, restando apenas, então, três reflectores, o que impossibilitaria a medição.

As características físicas do sistema de reflectores são as referidas na tabela 6.2 e o aspecto final do sistema de reflectores, depois de instalado no modelo, é representado nas figuras 6.8 e 6.9.

Tabela 6.2 – Características do sistema de reflectores.

Peça	Massa (kg)	Inércia centro de flutuação x (kg.m ²)	Inércia centro de flutuação z (kg.m ²)
Hastes do sistema de reflectores	0,037	0,00106	0,00106
Esferas	0,015	0,00086	0,00082
Total	0,052	0,00192	0,00188

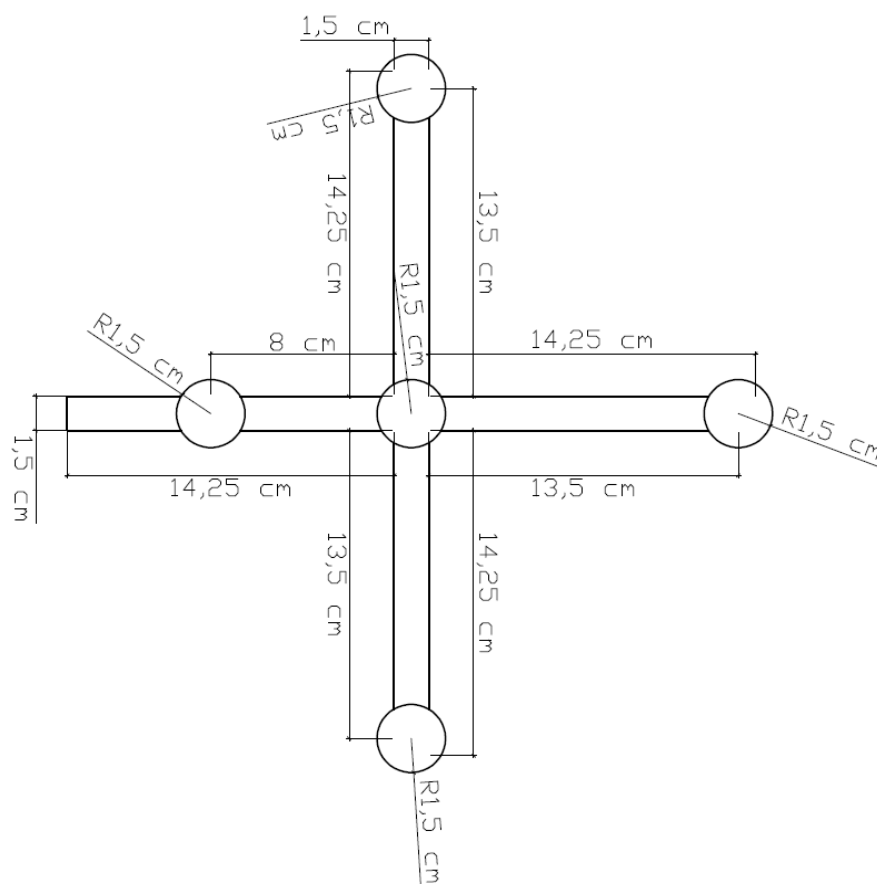


Fig.6.6 – Vista em planta do sistema de reflectores.

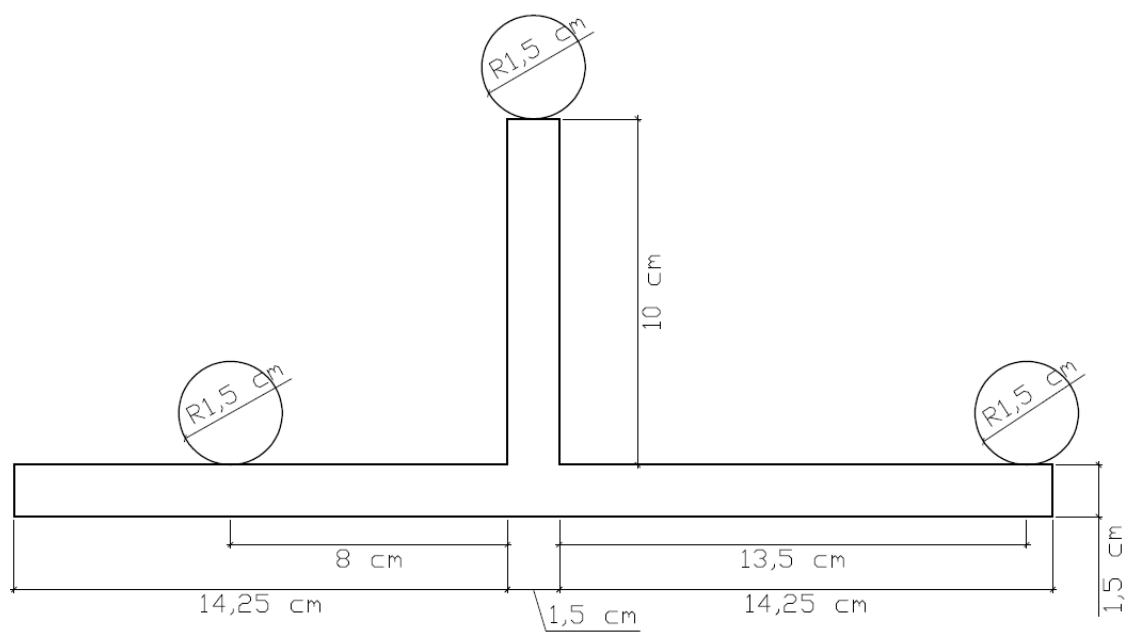


Fig.6.7 – Corte vertical do sistema de reflectores.

6.3.3. O CONJUNTO

As principais características geométricas, hidrodinâmicas e de massa do conjunto da bóia com o sistema de reflectores acoplado são apresentadas nas tabelas 6.3 a 6.5. Nas figuras 6.8 e 6.9 pode observar-se o aspecto do conjunto completo, bem como o referencial em relação ao qual foram definidas as características do corpo apresentadas nas tabelas acima referidas.

Tabela 6.3 – Principais características de massa do conjunto.

	Massa (kg)	Inércia centro de flutuação x (kg.m ²)	Inércia centro de flutuação z (kg.m ²)
Modelo	2,2200	0,03020	0,03020
Sistema de reflectores	0,0520	0,00192	0,00188
Total	2,2720	0,03212	0,03208

Tabela 6.4 – Principais características hidrodinâmicas do conjunto.

Volume deslocado (m ³)	0,002272
Inércia da secção molhada (m ⁴)	2,45x10 ⁻⁵
Altura metacêntrica (m)	0,0251

Tabela 6.5 – Principais características geométricas do conjunto.

	x (m)	z (m)	y(m)
Centro de gravidade	7,262x10-5	0	0,0741
Centro de impulsão	0	0	0,0884
Centro de flutuação	0	0	0,153

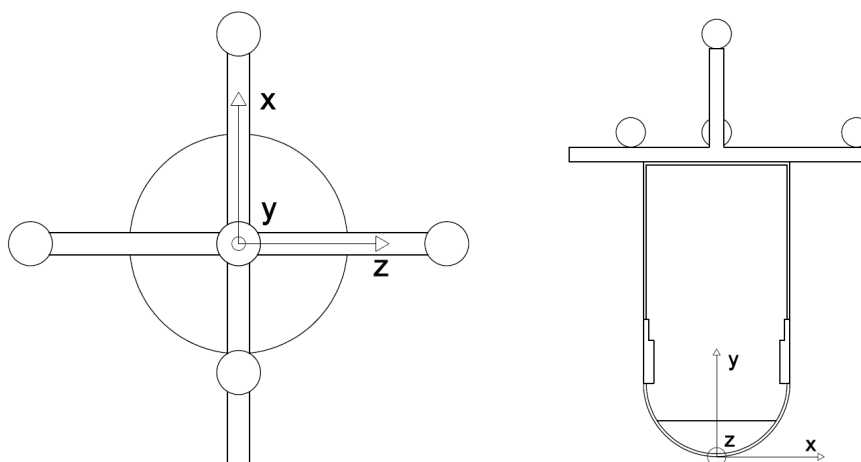


Fig.6.8 – Vista do conjunto em planta e em corte.



Fig.6.9 – Vista do conjunto com a calote desmontada (à esquerda) e montada (à direita).

6.3.4. CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS

Devido ao carácter variável dos diferentes ensaios a realizar, a configuração do equipamento experimental não permaneceu constante. O único equipamento que manteve uma configuração inalterada foi o sistema de aquisição de movimentos, cujas câmaras foram dispostas, relativamente ao volume de medição, como se mostra na figura 6.10. A frequência de aquisição das câmaras foi estabelecida em 24 Hz. Nos ensaios realizados sem ondas era indispensável a presença do operador no tanque, de modo a poder excitar correctamente o início do movimento do corpo. Para evitar perturbações ao corpo, durante o decorrer dos ensaios, causados por movimentos do operador na água, este esteve situado num cavalete, colocado no tanque, ao lado do corpo.

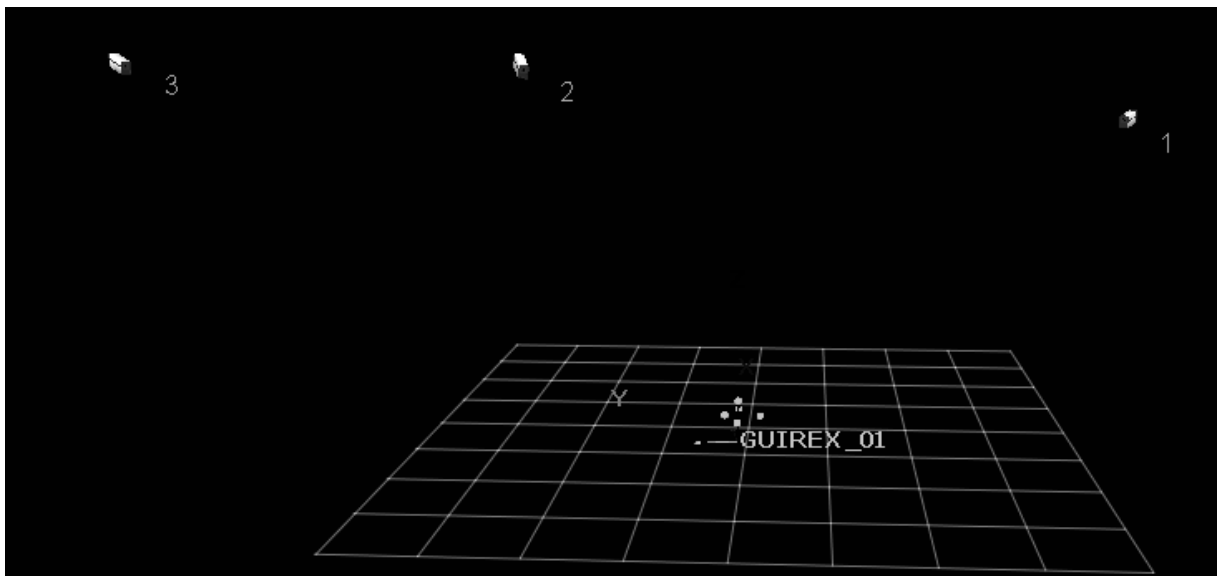


Fig.6.10 – Imagem tridimensional gerada por computador do posicionamento relativo das câmaras. Ao centro está uma representação do modelo, como detectado pelo sistema de aquisição de movimentos.

Nos ensaios com ondas, além do sistema de aquisição de movimentos, utilizou-se o equipamento de geração de ondas e a sonda de nível. Qualquer estrutura existente no tanque, além do corpo em estudo

e da sonda de nível, foi retirada, de modo a minimizar as inferências nas ondas geradas. A sonda de nível foi colocada ao lado do volume de medição, de modo a não interferir com o corpo, nem com o sistema de aquisição, mas ao mesmo tempo garantir que a altura de água medida era o mais próximo possível daquela experimentada pelo corpo. A frequência de aquisição de níveis pela sonda foi estabelecida em 24 Hz.

6.4. ENSAIOS

6.4.1. INTRODUÇÃO

O trabalho experimental compreendeu dois tipos de ensaios: ensaios sem ondas (ensaios de extinção) e ensaios com ondas. Os ensaios sem ondas têm como objectivo a determinação da frequência de oscilação natural do corpo, bem como do amortecimento total, em arfagem e em cabeceio. Os ensaios com ondas têm como objectivo determinar o comportamento do corpo, em arfagem e em cabeceio, nomeadamente a variação da amplitude dos movimentos, quando sujeito a ondas de altura constante e frequência variável.

6.4.2. ENSAIOS DE EXTINÇÃO

Este tipo de ensaio é bastante simples. O corpo foi colocado no tanque, sem ondas, com uma altura de água de 0,35 m. Foi aplicado um ligeiro deslocamento ao corpo (levantou-se ligeiramente no estudo do movimento em arfagem e inclinou-se ligeiramente no estudo do movimento em cabeceio) e soltou-se em seguida. Após a libertação do corpo, gerou-se um movimento oscilatório livre (vertical ou de rotação), como explicado em 5.4.2.2.

O movimento do corpo foi registado até à extinção, com o auxílio do sistema de aquisição de movimentos. De acordo com as metodologias explicadas detalhadamente mais adiante, a redução da amplitude dos movimentos do corpo ao longo do tempo é utilizada para determinar o amortecimento; o intervalo de tempo entre o início e fim de cada ciclo de oscilação é utilizado para determinar a frequência própria de oscilação natural. Para cada grau de liberdade (arfagem e cabeceio) foram realizados dez ensaios.

6.4.3. ENSAIOS COM ONDAS (DETERMINAÇÃO DA CURVA DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA)

Neste ensaio, o corpo foi colocado no tanque, com 0,35 m de profundidade de água. Por etapas de 200 segundos (ou enquanto o corpo se mantivesse dentro do alcance das câmaras IV do sistema de aquisição de movimentos) foram geradas ondas de 3 cm de altura, com uma determinada frequência. Os movimentos do corpo para cada frequência de onda gerada foram registados com auxílio do sistema de aquisição de movimentos. A altura instantânea de água foi registada com a sonda de nível. O objectivo do ensaio é determinar quais as frequências que geram respostas mais acentuadas do corpo, em cada um dos dois graus de liberdade em estudo (que se esperam iguais, ou muito próximas, das frequências determinadas pelos ensaios de extinção) e qual a amplitude dos movimentos do corpo para cada uma. Com estes valores e com os valores medidos pela sonda de nível, irá ser construída a curva do factor de amplificação dinâmica experimental, que se espera semelhante à apresentada na figura 5.9.

6.5. TRATAMENTO DE DADOS

6.5.1. FREQUÊNCIAS DE OSCILAÇÃO NATURAL

Tal como foi referido em 6.4.2., o período de oscilação natural de um corpo, em determinado grau de liberdade, é o intervalo de tempo decorrido entre o início e o fim de um ciclo completo de movimento oscilatório livre do corpo, nesse grau de liberdade. Quando, tal como no presente caso, se dispõe de um registo do movimento em função do tempo, o período pode ser facilmente encontrado, por exemplo, contando o tempo entre o início e o fim do registo, o número de ciclos existente e dividindo o primeiro pelo segundo, para se obter o valor médio do período.

No entanto, no presente caso, o número de registos, bem com a sua duração, é relativamente elevado, pelo que o processo apresentado acima seria demasiado moroso e consumiria demasiado tempo, sendo que o tempo disponível para tratamento e análise dos dados era bastante reduzido. De forma a facilitar a análise do registo, optou-se por se fazer um tratamento por transformadas de Fourier, Fast Fourier Transform (FFT), recorrendo à folha de cálculo Excel. Esta análise é possível porque o sistema de aquisição de movimentos não regista de forma contínua, mas sim por amostragem discreta de pontos com uma determinada frequência, 24 Hz nos ensaios realizados. Como resultado, obtém-se um espectro extremamente acentuado, figura 6.11, em que a frequência de pico é a frequência de oscilação natural.

Além do facto de consumir significativamente menos tempo, este método apresenta outras vantagens. Ao decompor o movimento em várias frequências, permite determinar aquela com mais efeito no movimento do corpo (frequência de oscilação natural) e filtrar as restantes, menos influentes, devidas a movimentos noutros graus de liberdade, instabilidades, oscilações de longo período eventualmente existentes no tanque, oscilações devidas a movimentos do próprio corpo no tanque, perturbações devidas ao operador, etc. Por outro lado, como o registo dos movimentos não é contínuo, os extremos do registo dificilmente corresponderão aos extremos reais do movimento e, desta forma, a determinação do intervalo de tempo entre extremos, tem um erro associado ao facto de estes não serem conhecidos. Ao utilizar a interpolação entre os pontos do registo, a análise de Fourier permite atenuar este problema.

Como desvantagem do método salienta-se o facto de o número de pontos a analisar ter de ser uma potência de dois, o que pode levar a que, para se obter um número de pontos adequado a ser analisado, grande parte dos pontos tenha que ser descartada, quando em excesso, ou grande parte dos pontos tenha que ser simulada, quando por defeito. Além disto, as frequências componentes do espectro serão apenas múltiplas, ou submúltiplas, da frequência de aquisição.

Tendo em conta as desvantagens desta análise, adoptou-se o seguinte critério: sempre que o número de pontos fosse claramente próximo de uma potência de dois, adicionava-se, ou retirava-se, o número de pontos em defeito, ou em excesso, e fazia-se a análise para esse número de pontos; quando o número de pontos estivesse significativamente afastado de qualquer potência de dois, adicionavam-se e retiravam-se os pontos necessários para se realizar a análise com as duas potências mais próximas e, seguidamente, calculava-se a média dos dois resultados. Sempre que houve necessidade de alterar o número de pontos do registo para se proceder à sua análise seguiu-se o seguinte procedimento: quando o número de pontos fosse excessivo, eliminavam-se os pontos necessários, contados a partir do fim do registo, zona mais perturbada e, portanto, menos significativa; quando fosse necessário simular pontos, calculava-se a média do registo e adicionavam-se pontos com esse valor, a partir do último ponto do registo original.

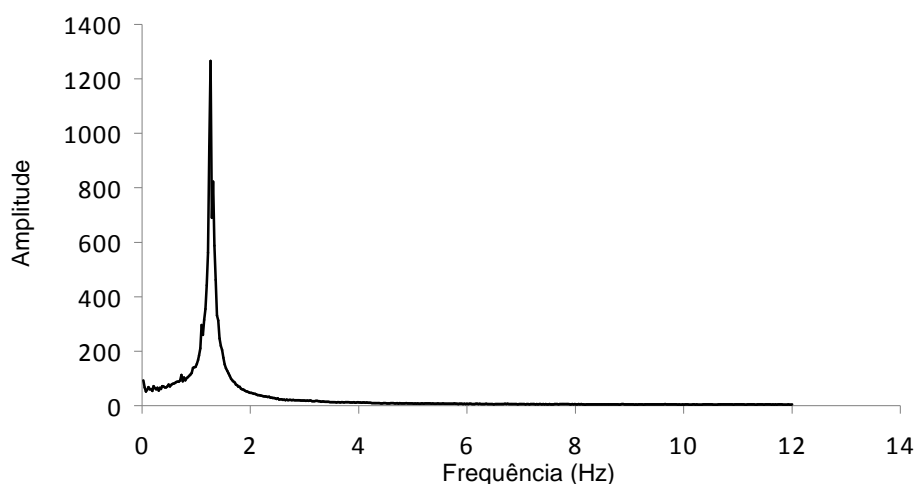


Fig.6.11 – Exemplo de espectro resultante da análise de Fourier, aplicado a um ensaio de extinção em arfagem.

Os resultados do estudo de frequências de ressonância são apresentados nas tabelas 6.6 e 6.7.

Tabela 6.6 – Resultados do estudo de frequência de ressonância (Hz) em arfagem.

Ensaio	nº de pontos	2 ⁿ	Frequência	F. Média	F. Média total	Frequência numérica
1	406	512	1,265625	1,2890625	1,2732	1,2793
		256	1,3125			
2	417	512	1,265625	1,2890625		
		256	1,3125			
3	412	512	1,265625	1,2890625		
		256	1,3125			
4	519	512	1,265625	1,265625		
5	1103	1024	1,265625	1,265625		
6	1587	1024	1,265625	1,271484375		
		2048	1,27734375			
7	1011	1024	1,265625	1,265625		
8	999	1024	1,265625	1,265625		
9	1212	1024	1,265625	1,265625		
			1,265625			
10	758	1024	1,265625	1,265625		
		512	1,265625			

Tabela 6.7 – Resultados do estudo de frequência de ressonância (Hz) em cabeceio.

Ensaio	nº de pontos	2 ⁿ	Frequência	F. Média	F. Média total	Frequência numérica
1	1506	1024	0,703125	0,708984	0,7301	0,8453
		2048	0,71484375			
2	1054	1024	0,7265625	0,726563		
3	1264	1024	0,7265625	0,726563		
		2048	0,7265625			
4	1653	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			
5	1643	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			
6	1334	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			
7	1752	1024	0,75	0,744141		
		2048	0,73828125			
8	1200	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			
9	1288	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			
10	1825	1024	0,7265625	0,732422		
		2048	0,73828125			

6.5.2. AMORTECIMENTO

Como foi referido em 6.4.2., para determinação do amortecimento estuda-se a redução da amplitude dos movimentos do corpo, em oscilação livre, ao longo do tempo. Em 5.4.3. mostrou-se que a equação que rege o movimento de um corpo flutuante é a seguinte:

$$\sum_{j=1}^6 ((a_{ij} + M_{ij}) \ddot{x}(t) + b_{ij} \dot{x}(t) + C_{ij} x(t)) = \text{Re} (AX_i e^{i\omega t}) \quad (6.1)$$

No caso de oscilação livre, a excitação forçada é nula e a equação (6.1) toma a seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^6 ((a_{ij} + M_{ij}) \ddot{x}(t) + b_{ij} \dot{x}(t) + C_{ij} x(t)) = 0 \quad (6.2)$$

que, admitindo apenas um grau de liberdade, se reduz a:

$$(a_{11} + M_{11}) \ddot{x}_{11}(t) + b_{11} \dot{x}_{11}(t) + C_{11} x_{11}(t) = 0 \quad (6.3)$$

Resolvendo a equação (6.3) em relação a x_{11} , obtém-se o seguinte resultado:

$$x_{11} = K e^{\frac{1}{2} \left(\frac{-b_{11}}{(a_{11}+M_{11})} \pm \sqrt{\left(\frac{b_{11}}{(a_{11}+M_{11})} \right)^2 - 4 \left(\frac{C_{11}}{(a_{11}+M_{11})} \right)} \right) t} \quad (6.4)$$

em que K representa uma constante que, no caso do movimento em estudo, corresponde à posição inicial do corpo. Dependendo do valor do argumento da raiz, podem existir três tipos de movimento:

- o argumento da raiz é maior do que zero – o movimento tem amortecimento superior ao crítico; não existe movimento oscilatório e o corpo tem dificuldade em voltar à posição de repouso;
- o argumento da raiz é zero – o movimento tem amortecimento crítico; o corpo regressa à posição de repouso, sem nunca inverter o sentido do movimento (não há movimento oscilatório), no mais curto intervalo de tempo possível;
- o argumento da raiz é negativo – o movimento tem amortecimento inferior ao crítico; gera-se movimento oscilatório em torno da posição de repouso.

O primeiro e o segundo casos correspondem a situações que raramente acontecem naturalmente e que não irão acontecer no caso em estudo, pelo que não serão tratados. No terceiro caso, a solução da equação toma a seguinte forma:

$$x_{11} = K e^{\frac{-b_{11}}{2(a_{11}+M_{11})} t} \cos(\omega t - \kappa) \quad (6.5)$$

A parte exponencial da expressão (6.5) corresponde aos efeitos do amortecimento, na amplitude do movimento, ao longo do tempo. A parte trigonométrica corresponde ao carácter oscilatório do movimento, que não tem interesse prático na determinação do amortecimento e, portanto, é eliminada. Assim, para determinação do amortecimento, apenas se utiliza a seguinte parcela:

$$x_{11} = K e^{\frac{-b_{11}}{2(a_{11}+M_{11})} t} \quad (6.6)$$

O que se pretende determinar é o valor do coeficiente b_{11} . Resolvendo a equação (6.6) em relação a b_{11} obtém-se:

$$b_{11} = -\frac{2(a_{11} + M_{11})}{t} \ln\left(\frac{x_{11}}{K}\right) \quad (6.7)$$

Os registos obtidos não fornecem, no entanto, pontos da curva (6.6), mas sim da curva do movimento real, equação (6.5). Os pontos teoricamente coincidentes nas duas curvas serão os pontos de amplitudes extremas (máximos positivos e máximos negativos). Nesse caso, para a determinação de b_{11} , a expressão (6.7), sofre a seguinte transformação:

$$b_{11} = -\frac{2(a_{11} + M_{11})}{T} \ln\left(\frac{x_{i+1}}{x_i}\right) \quad (6.8)$$

em que T representa o intervalo de tempo entre dois extremos consecutivos do movimento do corpo, num dado sentido (os dois positivos, ou os dois negativos), teoricamente igual ao período, e x_{i+1} e x_i , os valores da amplitude do movimento nos dois extremos anteriores. Tal como para os ensaios de determinação de frequência de oscilação natural, existe sempre um erro associado ao facto de o sistema de aquisição de movimentos dificilmente conseguir captar os extremos reais do movimento.

Como foi referido em 6.4.2., foram realizados dez ensaios de extinção em cada grau de liberdade. Como critério para o estudo do amortecimento, foi aplicada a expressão (6.8) aos primeiros seis intervalos entre extremos do movimento (três intervalos entre extremos positivos e três intervalos entre extremos negativos), como sugerido por [49], e calculada a média dos seis intervalos para cada ensaio. A razão para se considerarem apenas os primeiros seis intervalos tem a ver com as perturbações no movimento do corpo. Verificou-se que, a partir de determinada altura, possivelmente devido a ondas geradas pelo próprio corpo que foram reflectidas, ou a ondas longas, transversais, de difícil absorção, existentes no tanque, começam a aparecer batimentos nos registos, e as oscilações não chegam a extinguir-se completamente, figura 6.12. Sendo devidos à primeira causa, os batimentos só se tornam aparentes, ou importantes, no fim dos registos e, portanto, apenas devem ser consideradas os dados iniciais, ainda não afectados deste efeito. Sendo devidos à segunda, ou às duas em simultâneo, os batimentos existem ao longo de todo o registo, mas só se tornam perceptíveis, no fim. Ou seja, a percentagem do movimento devida aos batimentos no início do registo é menor do que no fim e, portanto, a utilização destes dados conduzirá a um erro na determinação do amortecimento menor do que com os dados finais. Note-se, contudo, que em qualquer dos casos, a amplitude dos batimentos é pequena.

Nesta análise admite-se que o amortecimento é linear e que o coeficiente de amortecimento é constante, o que não é de toda verdade uma vez que uma grande parte do amortecimento, o amortecimento viscoso, é dependente da velocidade do corpo e o amortecimento por radiação depende da frequência do movimento.

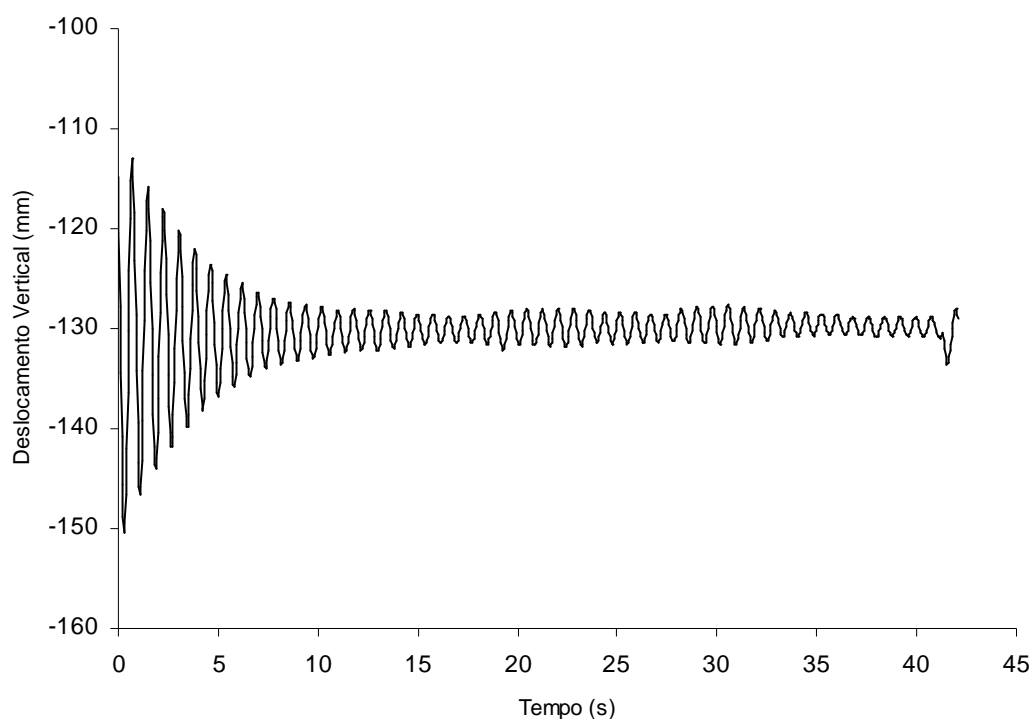


Fig.6.12 – Registro de ensaio de extinção, em que no final são perceptíveis batimentos.

Os resultados do estudo do amortecimento são apresentados nas tabelas 6.8 e 6.9. Na figuras 6.13 e 6.14 pode ver-se o resultado do ajuste da curva de extinção com o coeficiente de amortecimento determinado, aos resultados de ensaio de arfagem e cabeceio respectivamente.

Tabela 6.8 – Resultados do estudo do coeficiente de amortecimento em arfagem.

Ensaio	Argumento da exponencial	Argumento médio	Massa real (kg)	Massa adicional (kg)	Coeficiente de amortecimento (kg/s)
1	0,2075962772	0,2465	2,2720	0,4518	1,3430
2	0,2357232596				
3	0,2636581109				
4	0,2775546419				
5	0,2524195866				
6	0,2354045337				
7	0,2301094057				
8	0,2398590636				
9	0,2630653515				
10	0,2271752208				

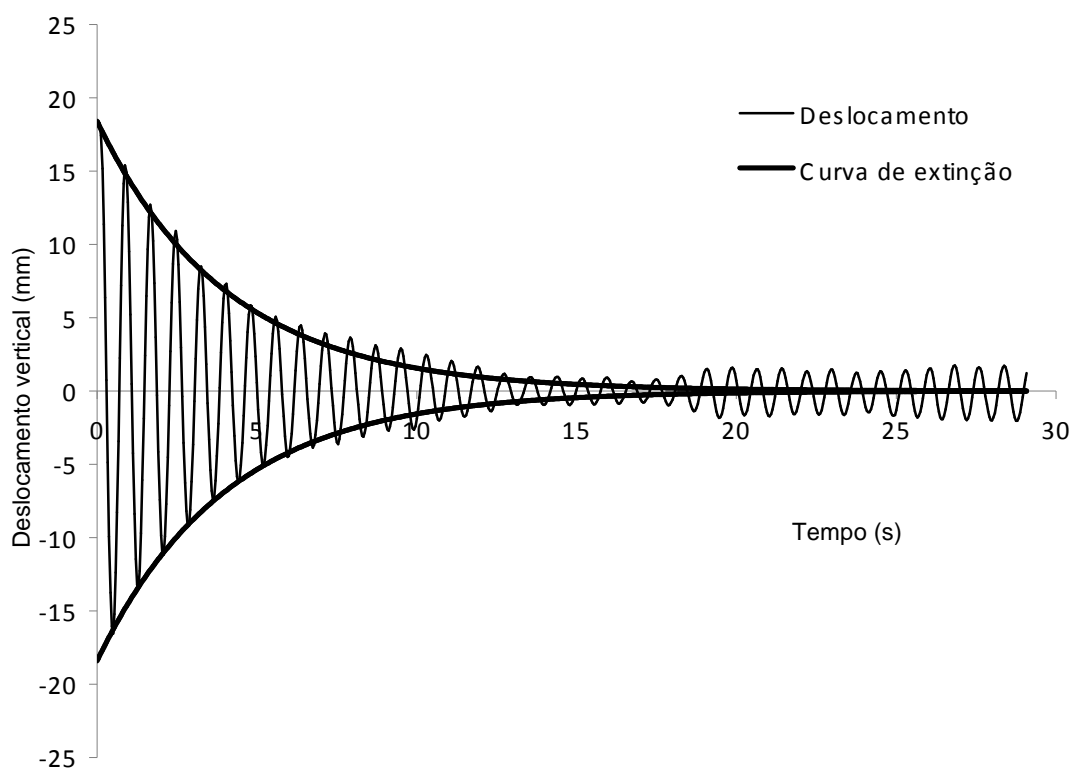


Fig.6.13 – Exemplo de registo de ensaio de extinção em arfagem, com curvas de extinção ajustadas.

Tabela 6.9 – Resultados do estudo do coeficiente de amortecimento em cabeceio.

Ensaio	Argumento da exponencial	Argumento médio	Inércia (kg.m^2)	Inércia adicional (kg.m^2)	Coeficiente de amortecimento ($\text{kg.m}^2/\text{s}$)
1	0,0337380904				
2	0,0463202841				
3	0,0497596335				
4	0,0504606313				
5	0,0441717658	0,04848	0,03211	0,00459	0,003558
6	0,0486644213				
7	0,0599517580				
8	0,0557011524				
9	0,0450572869				
10	0,0509336376				

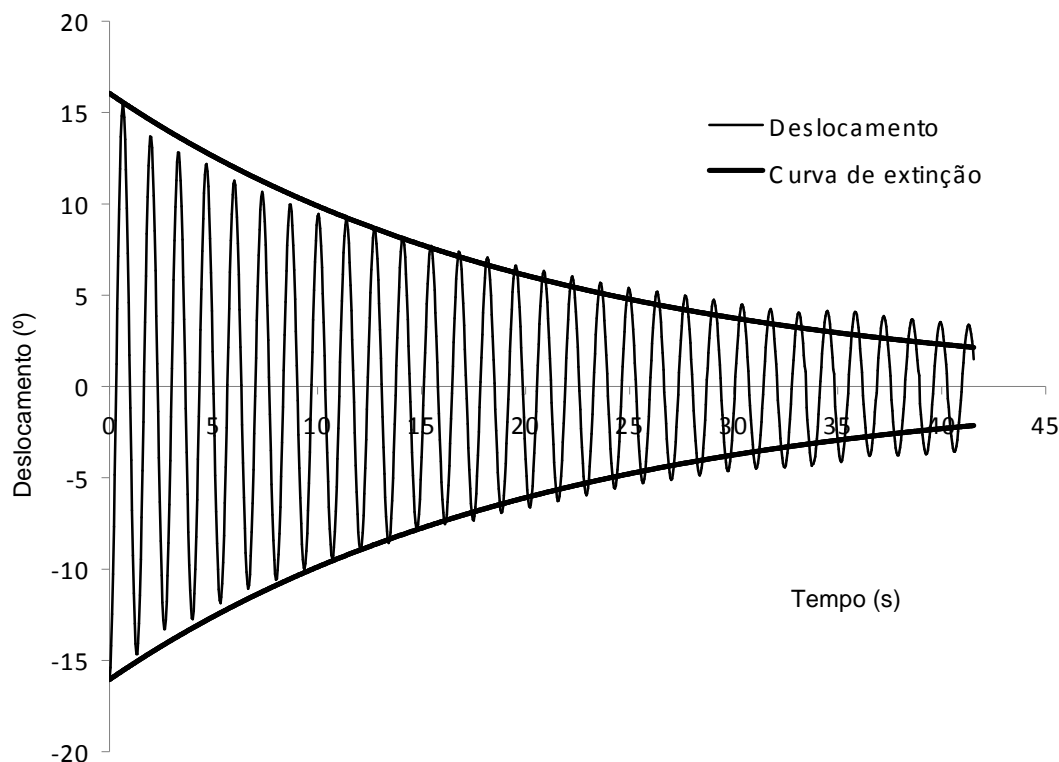


Fig.6.14 – Exemplo de registo de ensaio de extinção em cabeceio, com curvas de extinção ajustadas.

6.5.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA

Apesar de serem ensaios relativamente complexos, a teoria associada à sua análise é bastante simples. O objectivo é construir as curvas do factor de amplificação dinâmica do movimento do corpo, para cada grau de liberdade.

Para os ensaios de arfagem o factor de amplificação dinâmica, para cada frequência de onda incidente, é definido como a razão entre a amplitude do movimento do corpo e a altura de onda. Para os ensaios de cabeceio o factor de amplificação dinâmica foi definido como a razão entre a amplitude do movimento e o produto do diâmetro do corpo pela altura da onda.

Em teoria, bastaria calcular a altura média das ondas geradas pelos batedores, em modo estacionário (isto é, excluindo os efeitos de arranque e paragem dos batedores) e a amplitude dos movimentos do corpo, também em modo estacionário (mais uma vez, excluindo efeitos de arranque e paragem dos batedores) e construir as curvas. Para tal executar-se-iam ensaios de 200 segundos. Na realidade, dificuldades, imprevistos, interferências e fenómenos não acautelados tornaram esta tarefa mais complicada, como será descrito em pormenor mais adiante.

Os resultados do estudo das curvas do factor de amplificação dinâmica são apresentados nas tabelas 6.10 e 6.11 e nas figuras 6.15 e 6.16, aqui em conjunto com as mesmas curvas obtidas por simulação numérica, como mais à frente será descrito.

Tabela 6.10 – Resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica em arfagem.

Frequência (Hz)	FAD	Frequência (Hz)	FAD
0,2	0,970	1	1,555
0,3	1,285	1,1111	2,197
0,37	1,026	1,27	3,273
0,4	1,039	1,3	2,792
0,5	0,951	1,43	0,481
0,6	0,950	1,47	0,291
0,635	1,002	1,5	0,198
0,7	1,019	1,7	0,079
0,7194	0,990	1,9	0,010
0,736	1,062	2	0,011
0,76	1,218	2,1	0
0,8	1,362	2,3	0
0,9	1,134		

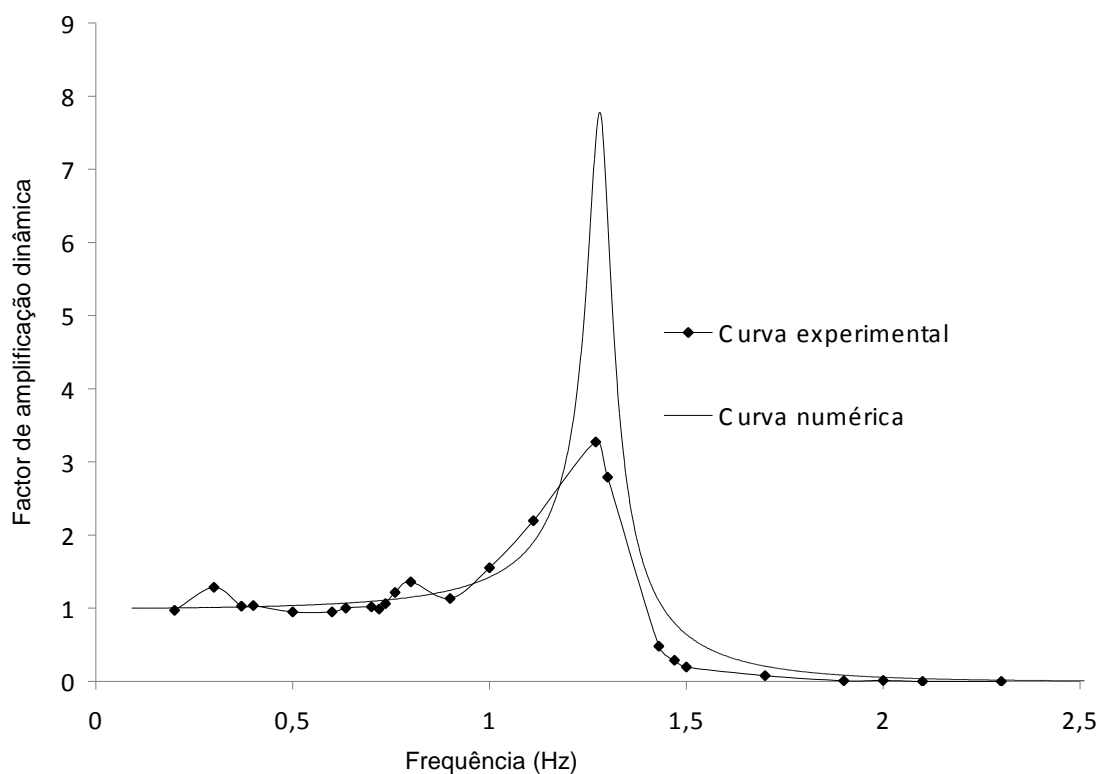


Fig.6.15 – Curvas do factor de amplificação dinâmica de arfagem.

Tabela 6.11 – Resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica em cabeceio.

Frequência (Hz)	FAD	Frequência (Hz)	FAD
0,2	0,129	1	1,068
0,3	0,332	1,1111	0,733
0,37	1,513	1,27	0,190
0,4	2,233	1,3	0,213
0,5	0,414	1,43	0,155
0,6	0,699	1,47	0,399
0,635	0,930	1,5	0,193
0,7	1,950	1,7	0,183
0,7194	2,131	1,9	0,045
0,736	2,624	2	0,020
0,76	2,851	2,1	0,072
0,8	1,752	2,3	0,034
0,9	1,335		

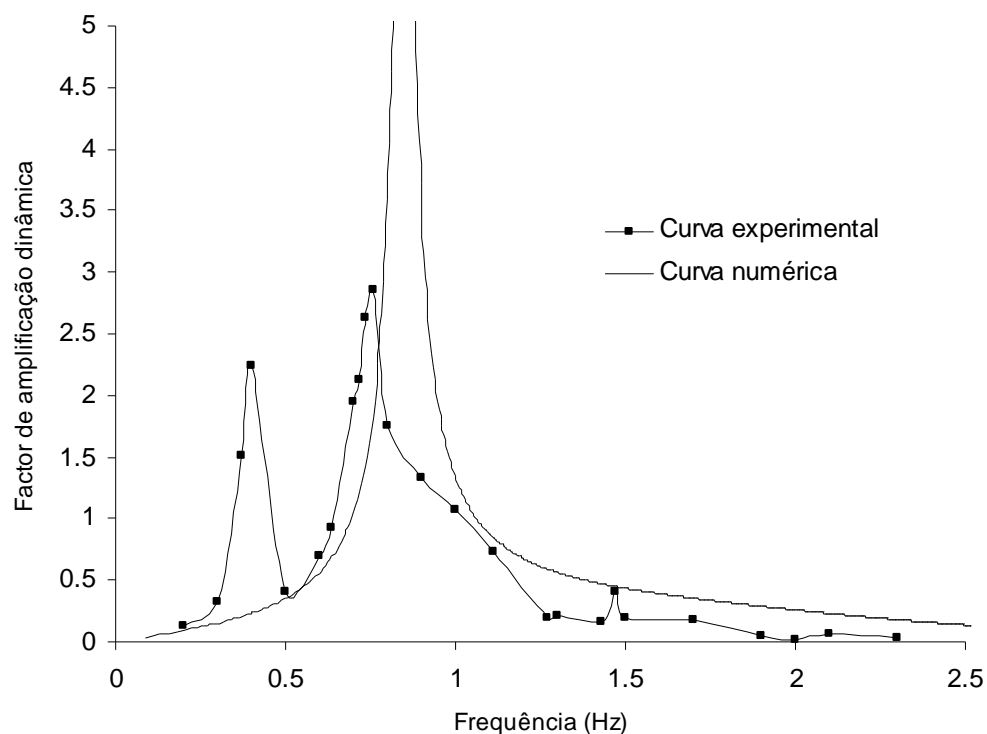


Fig.6.16 – Curvas do factor de amplificação dinâmica de cabeceio.

6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.6.1. INTRODUÇÃO

Foi efectuada uma análise dos resultados experimentais, dos seus principais erros e falhas, bem como uma comparação com os resultados de simulações numéricas utilizando um modelo apropriado para este tipo de análise, o WAMIT. Os resultados numéricos foram obtidos pela equipa do IST e são apresentados, no anexo A2. A sua reprodução é apenas parcial pois os dados gerados são demasiado volumosos para serem apresentados na íntegra. O intervalo em que estes são reproduzidos engloba tanto a zona de ressonância determinada numericamente, como aquela determinada experimentalmente, pois é deste intervalo que são retirados os valores indispensáveis para a análise a efectuar (frequências de ressonância, coeficientes de amortecimento e massas adicionais).

6.6.2. FREQUÊNCIAS DE OSCILAÇÃO NATURAL

6.6.2.1. Arfagem

Não considerando as pequenas diferenças, devidas, provavelmente, à discretização utilizada, quer no estudo numérico, quer no estudo experimental, pode considerar-se que a frequência de oscilação natural determinada numericamente é idêntica à determinada experimentalmente.

6.6.2.2. Cabeceio

Quando comparados os resultados numéricos com os experimentais, verifica-se uma diferença de quase 0,1 Hz, entre os valores determinados para a frequência de oscilação natural.

Considere-se a seguinte expressão [58]:

$$\omega_a = \omega_{n/a} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{b_c}\right)^2} \quad (6.9)$$

em que ω_a representa a frequência (angular) de vibração natural de um corpo sujeito a amortecimento, $\omega_{n/a}$ é a frequência (angular) de vibração natural do corpo, caso não existisse amortecimento, b é o coeficiente de amortecimento e b_c é o coeficiente de amortecimento crítico. Sendo $\omega_{n/a}$ e b_c constantes, verifica-se que a frequência de oscilação natural do corpo diminui à medida que o amortecimento aumenta. Se se tiver em conta que o programa de cálculo numérico utilizado para fazer a simulação não considera os efeitos de amortecimento viscoso, da determinação da frequência de oscilação natural vai resultar um coeficiente de amortecimento inferior ao real e, pela expressão (6.9), a frequência resultante será superior à real. Este efeito não é notório em arfagem porque, como se pode ver em 6.5.2. e será analisado em 6.6.3., os valores numéricos e experimentais do coeficiente de amortecimento neste grau de liberdade estão mais próximos (a diferença entre os dois é muito pequena) do que no caso de cabeceio, em que a diferença é maior.

6.6.3. AMORTECIMENTO

6.6.3.1. Arfagem

O valor do coeficiente de amortecimento determinado experimentalmente para arfagem, está razoavelmente de acordo com o determinado numericamente. Verifica-se, no entanto, que é mais elevado. Isto poderá dever-se ao facto do programa de computador utilizado para o cálculo numérico não considerar os efeitos do amortecimento viscoso. O amortecimento determinado experimentalmente engloba todas as formas de amortecimento experimentadas pelo corpo e daí o facto de ter um valor ligeiramente superior. Os valores entre os dois coeficientes são bastante próximos porque, neste caso, o volume submerso não é constante (variando muito rapidamente) e, por isso, o amortecimento por radiação, o único considerado pelo programa de cálculo numérico, é o dominante.

Há que ter em conta, também, que o corpo em estudo tem seis graus de liberdade e, por isso, sofre de amortecimento num dado grau de liberdade devido também a movimentos em todos os restantes, como foi explicado em 5.4.2.3. Além disso, o amortecimento determinado experimentalmente não discrimina qual o grau de liberdade que o origina. Apesar de, na realização dos ensaios, se ter procurado que apenas existisse movimento vertical, de modo a que todo o amortecimento gerado fosse proveniente desse grau de liberdade, o que é certo é que isso era fisicamente impossível de garantir. Assim, uma das causas para a diferença entre o valor do amortecimento determinado numericamente e o determinado experimentalmente é o facto do primeiro só conter amortecimento devido ao movimento vertical e o segundo conter uma parcela devido a movimentos noutros graus de liberdade.

Os eventuais erros devidos a falhas nos ensaios, ou análise dos dados, são muito pequenos pois, como se pode ver na figura 6.13, o coeficiente determinado experimentalmente adequa-se bastante bem aos registos obtidos, excepto na parte final. A não adequação na parte final tem como causa os efeitos dos batimentos referidos em 6.5.2. e o facto de o amortecimento ser não linear, variando com a velocidade, que, sendo menor no fim do registo, conduz a menores valores do coeficiente de amortecimento e, portanto, amplitudes maiores do que o esperado. Este facto é acentuado ainda por terem sido utilizados os primeiros seis intervalos do registo para determinação do amortecimento, altura em que este é mais intenso.

6.6.3.2. Cabeceio

O valor do coeficiente de amortecimento em cabeceio é também superior ao determinado numericamente, embora de forma mais acentuada do que no caso de arfagem. A diferença deve-se às mesmas causas apontadas em 6.6.3.1. No entanto, a razão para a diferença ser mais acentuada do que para arfagem dever-se-á ao facto de, neste caso, a superfície do corpo que se opõe ao escoamento durante o movimento oscilatório ser bastante maior, gerando maior atrito viscoso que, tal como já foi referido, não é contabilizado no cálculo numérico. Além disto, os movimentos neste grau de liberdade não implicam alteração significativa do volume submerso ao longo dos ciclos de oscilação, pelo que o amortecimento por radiação, o único considerado pelo programa de cálculo numérico, será apenas uma pequena parcela do amortecimento total.

Tal como indicado em 6.6.3.1., os erros devidos a falhas nos ensaios ou análise dos dados são reduzidos, dada a boa adequação do amortecimento determinado às curvas do registo. Também tal como foi referido em 6.6.3.1. a curva de amortecimento apenas começa a não ser adequada para descrever os movimentos na parte final, o que se deve às causas também já apresentadas em 6.6.3.1.

6.6.4. ANÁLISE DAS CURVAS DO FACTOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA

6.6.4.1. Introdução

Por ser uma parte fundamental do estudo realizado e, por todas as dificuldades e imprevistos, verificados durante a realização destes ensaios, a análise das curvas do factor de amplificação dinâmica merece uma atenção cuidada. Será primeiro realizada uma análise de curvas do factor de amplificação dinâmica de arfagem e de cabeceio individualmente e, depois, uma análise de tudo aquilo que não correu como esperado.

6.6.4.2. Arfagem

Os resultados obtidos em arfagem estão razoavelmente de acordo com o esperado. A curva começa com um patamar próximo de um, cresce de forma relativamente abrupta até ao máximo na frequência de 1,27 Hz, bastante próxima da frequência de ressonância determinada anteriormente e, logo a seguir, decresce, também bruscamente, para valores muito próximos de zero.

Verifica-se um pico na curva nas frequências próximas de 0,7 a 0,8 Hz, que se julga ser devido a interferências com o movimento de cabeceio, uma vez que se trata de frequências próximas da de ressonância neste grau de liberdade.

Quando comparada com a curva determinada numericamente, verifica-se que o factor de amplificação dinâmica máximo em ressonância é bastante superior ao obtido experimentalmente. Isto dever-se-á, sobretudo, ao facto já referido, do programa de computador utilizado para a determinar, não considerar os efeitos do amortecimento viscoso. Este amortecimento aumenta com a velocidade que, por sua vez, é máxima na ressonância.

Uma falha clara é a fraca definição da frequência de ressonância, havendo um grande espaçamento entre a frequência de amplitude máxima e as adjacentes, o que não permite estabelecer, com rigor, a curva. O facto da curva numérica ser bastante superior à experimental pode dever-se, em parte, à falta de definição da segunda, embora, tendo em conta que a frequência máxima é bastante próxima da de ressonância (tanto da determinada experimentalmente, como da determinada numericamente) este facto não deva ter grande peso. Esta falha deveu-se ao pouco tempo disponível para realizar os ensaios. Infelizmente, o prazo para a sua realização era pequeno e não foi possível fazer o estudo de frequências de ressonância adequado antes dos ensaios com ondas. Fez-se um estudo prévio relativamente simples, que permitiu estudar a frequência de 1,27 Hz, efectivamente próxima da de ressonância, mas não permitiu definir o intervalo a pormenorizar com mais rigor. A isto junta-se a pouca experiência do operador (que era absolutamente nula até à realização destes ensaios) que não permitiu que o mesmo estivesse consciente da elevada sensibilidade do corpo à variação da frequência das ondas, quando próximas da de ressonância. Outra falha, embora não importante para os resultados, mas sim do ponto de vista do conhecimento do operador, é a excessiva pormenorização nas frequências baixas.

Como última ressalva, note-se que as frequências de 2,1 Hz e 2,3 Hz têm valores efectivamente nulos de factor de amplificação dinâmica. Infelizmente, devido ao efeito Doppler, que invalida grande parte do registo, como será explicado mais adiante, a amplitude dos movimentos detectada em arfagem é muito pequena (praticamente nula) para o intervalo em que se consegue um registo válido.

6.6.4.3. Cabeceio

Ao contrário do que acontece em arfagem, a curva de cabeceio apresenta um resultado bastante diferente do esperado. Verifica-se que o máximo do factor de amplificação dinâmica ocorre para uma frequência de 0,76 Hz e não para 0,736 Hz, como seria de esperar. Este fenómeno pode ser devido à fraca definição da curva na ressonância, com as mesmas causas que já foram apresentadas para arfagem. De qualquer das formas verifica-se que a frequência de 0,76 Hz tem o valor do factor de amplificação dinâmica maior do que 0,736 Hz, quando seria de esperar o contrário, visto que a última está mais próxima de frequência de ressonância determinada experimentalmente. Há que ter em conta, também, que a maior parte das ondas geradas não tinham um perfil sinusoidal perfeito e que, portanto, as condições relativas aos fenómenos de oscilação, explicadas em 5.4, baseadas na ocorrência de ondas sinusoidais descritas pela teoria linear, perdem parte da sua validade. Sendo a inclinação das faces da onda a característica que, provavelmente, mais se altera em ondas não lineares (quando comparadas com ondas lineares) e sendo esta que excita o movimento de rotação, parte da alteração da frequência de resposta máxima em relação ao esperado poderá ser explicada por esta diferença. A não ocorrência deste fenómeno em arfagem pode estar relacionada com o facto de este movimento depender mais da diferença de tempo entre a crista e a cava, que não se altera significativamente, do que da geometria da onda propriamente dita.

Verifica-se, também, inesperadamente, a ocorrência de dois grandes picos, em que um deles, igual a 0,4 Hz, está relativamente afastado da frequência de ressonância. Repare-se que esta frequência é cerca de metade da frequência de ressonância, ou seja, um sub-harmónico. Quando excitado pela passagem de uma onda, o corpo, em vez de ter o seu movimento imediatamente amortecido pela onda seguinte, tem bastante tempo para oscilar livremente, entre a passagem de duas cristas, sendo que a onda seguinte estará em fase com o movimento do corpo, ou apenas muito ligeiramente desfasada, e excitá-lo-á no sentido do seu movimento, causando um fenómeno semelhante a ressonância. Um fenómeno semelhante acontece para a frequência de 1,47 Hz, cerca do dobro da frequência de ressonância. No entanto, como a frequência das ondas é maior, o movimento livre do corpo é rapidamente contrariado pela onda seguinte. Este fenómeno não se verifica em arfagem provavelmente devido ao facto do amortecimento neste grau de liberdade ser bastante maior do que em cabeceio.

Tal como para arfagem, verifica-se uma diferença entre a curva numérica e a experimental, entre o factor de amplificação dinâmica máximo dos movimentos da curva determinada numericamente e da curva determinada experimentalmente, bem como um desvio da frequência de ressonância sugerida por cada uma das curvas. Ambos os efeitos deverão ser devidos à não consideração do amortecimento viscoso por parte do programa de cálculo numérico o que, por um lado, conduz a maiores amplitudes dos movimentos e, por outro lado, como foi explicado em 6.6.2.2. causa um desvio na frequência de ressonância. Poderá, também, ser parcialmente devido ao facto do programa de cálculo numérico apenas considerar a existência de ondas lineares e, como já foi referido, a maior parte das ondas geradas não tinham um perfil sinusoidal perfeito, não podendo, portanto, ser consideradas lineares. A diferença entre os valores das amplitudes máximas poderá, em parte, ser explicada pela falta de definição da curva experimental na vizinhança da frequência de ressonância.

6.6.4.4. Efeito Doppler

A realização de ensaios com o corpo livre, implica a sua sujeição aos efeitos de deriva causados pelas ondas. Enquanto que, para baixas frequências, o corpo mantinha uma posição média entre ciclos praticamente constante, ou um movimento de translação extremamente lento, para frequências a partir de 1,3 Hz, o corpo adquire velocidades de translação bastante elevadas, da ordem de 10 cm/s e que

crecem com a frequência das ondas, figura 6.18. Esta velocidade não é desprezável, quando comparada com a celeridade das ondas, que diminui com o aumento da frequência, gerando o chamado efeito Doppler. Como consequência há uma notável diferença entre a frequência da onda emitida e a frequência da onda efectivamente incidente no corpo, que chega a ser de cerca de 50 %, figura 6.17 (o corpo oscila numa frequência igual a metade da da onda gerada). Devido a este efeito, grande parte do registo do movimento do corpo para estas frequências tem que ser desprezado, porque não é relativo à frequência gerada. A isto tem de se adicionar o facto de, ao reduzir-se a frequência da onda efectivamente incidente no corpo, se estar mais próximo da frequência de ressonância, nos dois graus de liberdade e, por isso, as amplitudes dos movimentos crescerem bruscamente. Assim, para estas gamas de frequências, apenas se dispõe de um intervalo de registo efectivamente útil muito curto, respeitante ao espaço de tempo decorrido entre o instante após a fase de arranque dos batedores (estado transitório) e o instante em que o corpo começa a deslocar-se com velocidade demasiado elevada. Para estas frequências, os valores registados nas curvas estão envoltos em grandes dúvidas, devido ao facto do intervalo de tempo útil para análise ser extremamente curto e haver forte possibilidades de, nesse mesmo intervalo, existirem já interferências de fenómenos transitórios que afectam os resultados.

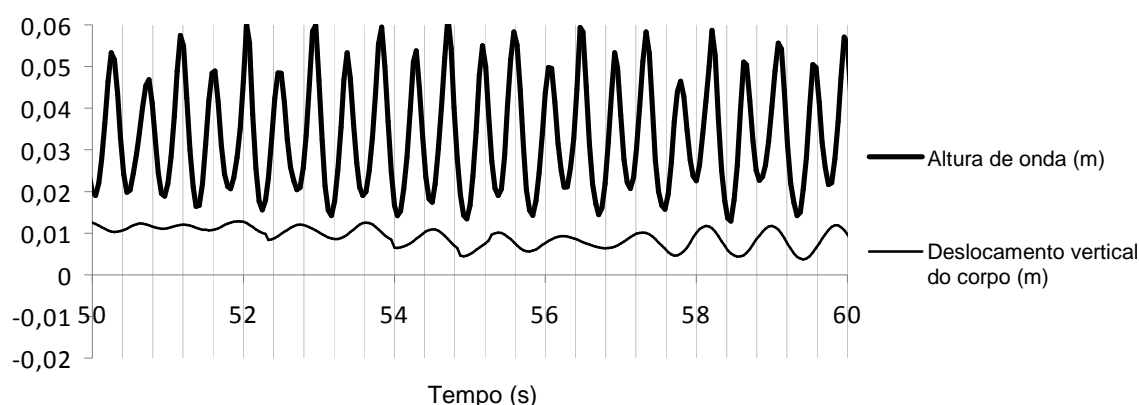


Fig.6.17 – Efeito Doppler (note-se que o período do movimento do corpo é bastante superior ao da onda gerada). Confrontar com a figura 6.18, correspondente ao deslocamento longitudinal em função do tempo para o mesmo ensaio.

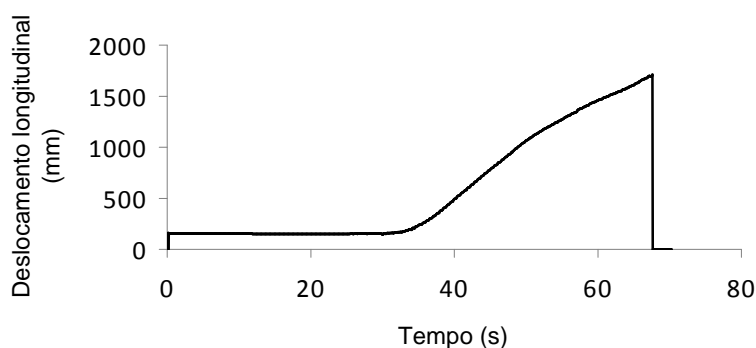


Fig.6.18 – Deslocamento longitudinal do corpo (note-se que, a partir do momento em que o corpo é submetido à acção da agitação, por volta dos 32 s, o deslocamento cresce muito rapidamente, logo há grandes velocidades longitudinais).

6.6.4.5. Efeito de precessão

No decorrer dos ensaios verificou-se a ocorrência de um fenómeno interessante. Para frequências acima de cerca de 1,3 a 1,5 Hz, o corpo, ao fim de alguns segundos sujeito à agitação em estado estacionário, apresenta rapidamente uma instabilidade que introduz um movimento rápido e violento, semelhante à precessão da Terra (não no princípio, apenas no movimento descrito, isto é, rotação, com uma inclinação considerável, em torno de um eixo vertical). Este movimento era de tal forma violento que, nos testes iniciais, um choque do corpo animando deste movimento com uma estrutura existente no tanque, quebrou uma das hastes do sistema de reflectores. Não foi possível determinar a causa deste movimento, mas pensa-se que merece investigação futura.

6.6.4.6. Deficiente funcionamento dos batedores

Um efeito inesperado inerente ao sistema de geração de ondas foi o facto de, para frequências superiores a 1,5 - 1,7 Hz as ondas geradas serem muito pouco regulares, havendo forte deformação das mesmas, na zona correspondente à separação entre batedores adjacentes. Devido a este fenómeno, mais uma vez, os dados relativos a estas frequências devem ser analisados com cuidado.

Apesar de se pensar, no início, que esta seria a causa do referido “movimento de precessão”, verificou-se que este também ocorria para frequências em que as ondas registadas pela sonda eram perfeitamente regulares.

6.6.5. DIFICULDADES

6.6.5.1. Efeitos da luz solar

Na altura do ano em que os ensaios foram realizados, devido às condições de iluminação natural do laboratório de hidráulica, verifica-se a incidência de luz solar directamente no tanque de ondas, devendo ter-se em consideração que esta luz é extremamente rica em radiação IV. Sendo as câmaras de registo dos movimentos também do tipo IV, as reflexões geradas na água do tanque e captadas pelas câmaras introduzem perturbações no sistema, figura 6.19, mesmo quando a luz não incide directamente no volume de medição (espaço captado pelo conjunto das três câmaras).

As reflexões com a água estática dificultaram sistematicamente a detecção do corpo pelo sistema de aquisição de movimentos. Após início da geração de ondas, a superfície do tanque torna-se extremamente irregular e as reflexões, em vez de serem estáticas, o que atrasava a detecção do corpo, mas permitiam que, ao fim de algum tempo, o sistema as conseguisse filtrar, variavam instantaneamente e tornavam por vezes praticamente impossível o registo. Não há um único registo de ensaios com agitação que não tenha erros causados pela luz solar. Nos casos em que a luz solar incidia directamente sobre o volume de medição, o que acontecia cerca de três vezes numa tarde, o registo era simplesmente impossível, devido à forte intensidade da radiação captada pelas câmaras, e os ensaios tinham que ser interrompidos por períodos de 45 a 60 minutos. Este inconveniente foi a principal causa do pouco aproveitamento do tempo disponível para a realização dos ensaios, obrigando à repetição morosa de todas as medições realizadas com agitação.

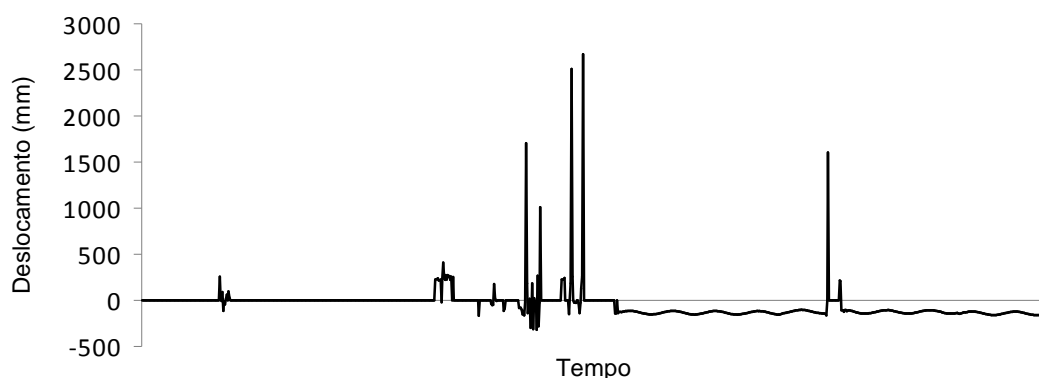


Fig.6.19 – Exemplo de registro perturbado pela luz solar. Claramente, os movimentos registrados não são possíveis nas condições em que foram realizados os ensaios.

6.6.5.2. Posicionamento das câmaras

Infelizmente, devido ao reduzido espaço disponível no laboratório para um posicionamento aceitável das câmaras, este não foi o mais adequado. Assim, o volume de medição era demasiado pequeno, em relação ao que era desejável e o ângulo das câmaras com a horizontal era demasiado reduzido. Como consequência do reduzido volume de medição, nos casos em que o corpo apresenta uma velocidade de translação considerável, o movimento apenas pôde ser registado parcialmente, pois a partir de determinada altura o corpo saía do alcance das câmaras. Como consequência dos reduzidos ângulos, nos casos em que o corpo apresenta movimentos de oscilação rápidos, por exemplo, em ressonância, havia grande probabilidade dos reflectores se obstruírem mutuamente, ou serem obstruídos pelas hastes, impedindo também por este efeito o registo correcto dos movimentos do corpo.

6.6.5.3. Sistema de reflectores

Combinado com o posicionamento das câmaras, não tão bom quanto desejável, as características do sistema de reflectores também foram responsáveis por dificuldades no registo. Apesar de cumprirem todos os requisitos do fabricante do sistema de aquisição de movimentos, o que é certo é que estes não dão uma garantia de operacionalidade total e que, com a disposição das câmaras utilizada, o sistema de reflectores era insuficientemente assimétrico e demasiado susceptível a obstruções. No futuro dever-se-á optar por sistemas com hastes horizontais mais extensas, hastes verticais mais curtas, e maior assimetria, eliminando, se possível, todos os planos de simetria vertical, de modo a aumentar a fiabilidade do sistema.

6.6.5.4. Tempo

Sem ser uma dificuldade, ou problema, por si só, a falta de tempo foi, no entanto, talvez a principal causa da impossibilidade de resolução dos problemas enunciados anteriormente, pela seguinte razão: as conclusões tiradas anteriormente demonstram que, após a realização dos ensaios e análise dos dados, a experiência obtida era já suficiente para atenuar ou corrigir grande parte dos problemas encontrados. No entanto, a falta de tempo impediu a repetição dos ensaios. As razões para a falta de tempo devem-se a vários problemas, nomeadamente o tempo decorrido para construção do modelo. A

altura em que o modelo foi encomendado ao INEGI, coincidiu com o início da mudança das suas instalações e todo o processo esteve parado durante alguns meses. Como resultado, o modelo apenas ficou disponível na última semana de Abril, deixando apenas cinco semanas para realização de todo o trabalho experimental, tratamento e análise de dados, conclusões e encerramento do trabalho de tese.

7

CONCLUSÕES

Foi efectuada uma compilação e descrição das tecnologias de conversão de energia das ondas mais significativas e, aparentemente, mais promissoras. Em termos experimentais foram realizados ensaios para a determinação das principais características hidrodinâmicas do modelo, de modo a validar os modelos de cálculo em estudo e desenvolvimento no IST.

As diferenças verificadas entre os resultados experimentais e os numéricos, além de serem devidas às claras diferenças entre os dois, nomeadamente a incapacidade de se reproduzir com exactidão em modelo numérico as condições naturais, serão também devidas, em parte, a falhas do operador.

De uma forma mais concreta, verifica-se que o programa de cálculo numérico utilizado é razoavelmente adequado para descrever o comportamento do corpo em arfagem, mas parece apresentar algumas falhas nos estudos de cabeceio, nomeadamente em termos de frequências de ressonância, amortecimento e resposta à excitação.

No caso de arfagem, a informação fornecida tem sobretudo valor do ponto de vista qualitativo (excepto no amortecimento, que foi determinado com algum rigor), pois do ponto de vista quantitativo verificou-se que os seus resultados estão exagerados em relação à realidade (permite conhecer com rigor a frequência de ressonância, mas não a intensidade da resposta do corpo).

Os constrangimentos verificados e descritos colocam algumas reservas em relação à qualidade dos resultados experimentais apresentados, pelo que a sua consideração deve ser feita com cautela. A falta de tempo não permitiu a obtenção de resultados mais fiáveis, nem a correcção de algumas falhas detectadas.

O objectivo deste trabalho era estudar também o sistema de amarrações de um dispositivo de conversão de energia das ondas, mas, devido à falta de tempo, tal não foi possível. Optou-se, no entanto, por não se remover o capítulo 4, Sistemas de Amarração, pois, desta forma, apesar de não haver qualquer resultado experimental com amarrações, fica desde já estabelecida uma base teórica para apoio ao trabalho experimental futuro.

Como recomendações para melhoria, apresentam-se três pontos: condições de iluminação natural do tanque de ondas, configuração do sistema de alvos e posicionamento do sistema de câmaras.

Como trabalho a desenvolver no futuro, além do estudo do comportamento do corpo amarrado, sugere-se a investigação das causas do fenómeno de instabilidade referido em 6.6.4.5. e de medidas que permitam contornar as consequências do efeito Doppler para altas frequências, de modo a que se possam estudar correctamente os efeitos das mesmas.

Em resumo, com estas ressalvas, os resultados mostram que o modelo numérico, sem satisfazer totalmente, consegue simular adequadamente o comportamento do corpo em arfagem, que é o movimento fundamental para o funcionamento previsível do dispositivo em estudo.

BIBLIOGRAFIA

Referências

- [1] Veloso Gomes, F. Teoria Linear – Solução de Airy. 2007.
https://www.fe.up.pt/si/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=33629&pv_cod=14hYLPa4rsIL. 28-10-2007
- [2] U.S. Army Corps of Engineers. *Engineering and Design Coastal Engineering Manual*. 2003.
<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals>. 30-8-2007.
- [3] Wiegel, R. L. *Oceanographical Engineering*, USA, 1964.
- [4] Pinto, F. T., Silva, R. *Specific kinetic energy concept for regular waves*. Ocean Engineering 33 (2006), pp. 1283-1298, Elsevier Ltd., Amsterdam.
- [5] Taveira Pinto, F. *Trabalhos Marítimos 2 – Agitação Irregular*. 2008
https://www.fe.up.pt/si/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=41963&pv_cod=3112qaTawyc8
- [6] Veloso Gomes, F. Taveira Pinto, F. Carneiro de Barros, R. *Agitação Marítima Irregular*. 1985.
https://www.fe.up.pt/si/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=41964&pv_cod=36HawaT7aas. 25-3-2008
- [7] Alves, J. H. G. M., Banner, M. L. Young, J. R. *Revisiting the Pierson-Moskowitz Asymptotic Limits for Fully Developed Wind Waves*. Journal of Physical Oceanography, Vol.33 July 2003, pp. 1301-1323, American Meteorological Society, Boston, 2003.
- [8] Centre for Renewable Energy Sources (CRES). *Wave energy Utilization in Europe, Current Status and Perspectives*. 2002. <http://www.wave-energy-centre.org/pagesp/WaveEnergyBrochure.pdf>. 10-9-2007.
- [9] Centre for Renewable Energy Sources. *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent Advancements and Prospects*. D-G for Research European Commission, Brussels, 2006.
- [10] IEA-OES. *Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Current Energy*. 2003.
- [11] ETSU. *New and Renewable Energy: Prospects in the UK for the 21st Century: Supporting Analysis*. ETSU Report R-122, Harwell, Oxon, 1999.
- [12] Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A. *Energia das ondas*. 2004. <http://www.wave-energy-centre.org/pagesp/Cruz.pdf>. 10-9-2007.
- [13] AEA Energy and Environment. *Review and Analysis of ocean Energy Systems Development and Supporting Technologies*. IEA's Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Dublin 2006.
- [14] Brooke, J. – ECOR. *Wave Energy Conversion*. Elsevier Ltd., Amsterdam, 2003.
- [15] <http://www.dee.feis.unesp.br/usinaecoeletrica/undimotriz/conwec.htm>. 28-9-2007
- [16] <http://www.dee.feis.unesp.br/usinaecoeletrica/undimotriz/conwec.htm>. 28-9-2007
- [16] <http://www.floatinc.com>. 14-9-2007
- [17] <http://www.sperboy.com>. 6-9-2007
- [18] <http://www.emec.org.uk>. 10-9-2007

- [19] <http://www.biopowersystems.com>. 9-9-2007
- [20] EPRI. *California Wave Power Demonstration Project, Bridging the Gap Between the Completed Phase 1 Project Definition Study and the next Phase – Phase 2 Detailed Design and Permitting*. 2007. http://oceanenergy.epri.com/attachments/wave/reports/Phase_15_CA_Report_031407.pdf. 31-1-2008.
- [21] <http://www.finavera.com>. 10-9-2007
- [22] <http://www.ips-ab.com>. 17-9-2007
- [23] <http://www.mech.ed.ac.uk/research/wavepower>. 14-9-2007
- [24] Payne, G. S., Taylor, J. R. M., Bruce, T, Parkin, P. *Assessment of boundary-element method for modelling a free-floating sloped wave energy device. Part 1: Numerical modelling*. Ocean Engineering 35 (2008), pp. 333-341, Elsevier Ltd., Amsterdam
- [25] <http://www.awsocan.com>. 6-9-2007
- [26] <http://www.oceanpd.com>. 31-8-2007
- [27] <http://www.windwavesandsun.com>. 14-9-2007
- [28] <http://www.oceanwavemaster.com/pdf/owl-2.pdf>. 14-9-2007
- [29] <http://www.oceanwavemaster.com>. 14-9-2007
- [30] Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Prentice, M. E., Rainey, R. C. T., Rimmer, S. J., Roach, A. T. *Development of the ANACONDA all-rubber WEC*. Proc. 7th European Wave and Tidal Conference, 2007, Porto, Portugal, (IDMEC – Instituto de Engenharia Mecânica, ed.), Lisboa.
- [31] <http://anacond.neuf.fr>. 16-3-2008
- [32] <http://www.cwavepower.com>. 31-8-2007
- [33] <http://www.wavedragon.net>. 10-9-2007
- [34] <http://www.waveenergy.no>. 10-9-2007
- [35] Kubota, M., Fujita, I., Watanabe, H., Noda, I., Noguchi, H., Murota, K., Uezono, A. *A New Type of Overtopping Wave-Driven Pump Without Moving Parts*. <http://www.waveplane.com/old/wave-driven%20pump1.pdf>. 20-9-2007
- [36] <http://www.cd-adapco.com/about>. 28-10-2007
- [37] <http://www.neptunesystems.net>. 28-9-2007
- [38] <http://www.ecofys.co.uk>. 24-9-2007
- [39] <http://www.sde.co.il>. 10-9-2007
- [40] <http://www.treefinder.de/ideas>. 10-9-2007
- [41] <http://www.owel.co.uk>. 14-9-2007
- [42] <http://www.waveenergymachine.com>. 17-9-2007
- [43] <http://www.sri.com>. 22-9-2007
- [44] Leirbukt, A., Tubaas, P. *A wave of renewable energy*. 2006. [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/6beb8a00b54b0a94832572fa002f4214/\\$file/WavearticleABBReview.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/6beb8a00b54b0a94832572fa002f4214/$file/WavearticleABBReview.pdf). 25-9-2007

- [45] <http://www.wavestarenergy.com>. 6-9-2007
- [46] Wave Star Energy. *Wave Star Energy*. 2006. http://www.wavestarenergy.com/pdf/UK_web.pdf. 6-9-2007
- [47] <http://www.manchesterbobber.com>. 14-9-2007
- [48] Bowers, E. C., Standing, R. G. *Environmental loading and response*. Proc. of the IEC conference on Offshore Moorings, (Owen, D. G., Abdi, S. M., Elliot, G., Ridley, T. Ross, E. A., Standing, R. G. ed.), 10 March 1982, East Kilbridge, pp. 1-26, Thomas Telford, Ltd, London
- [49] Johannig, L., Smith, G. H., Wolfram, J. *Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices*. Ocean Engineering 34 (2007), pp. 1918-1934, Elsevier Ltd., Amsterdam.
- [50] Fitzgerald, J, Bergdahl, L. *Considering Mooring Cables for Offshore Energy Converters*. Proc. 7th European Wave and Tidal Conference, 2007, Porto, Portugal, (IDMEC – Instituto de Engenharia Mecânica, ed.), Lisboa.
- [51] Brown, D. T. Mooring systems. In. *Handbook of Offshore Engineering*, pp. 663-708, Chakrabarti, S, (Ed.), Amsterdam, 2005.
- [52] Jordan, P. A., Brewerton, R. W. *Offshore catenary moorings*. Proc. of the IEC conference on Offshore Moorings, (Owen, D. G., Abdi, S. M., Elliot, G., Ridley, T. Ross, E. A., Standing, R. G. ed.), 10 March 1982, East Kilbridge, pp. 95-114, Thomas Telford, Ltd, London
- [53] Tupper, E. *Introduction to Naval Architecture 3rd Ed*. Butterworth Heinemann, Oxford, 2002.
- [54] Newman, J. N. *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press, London, 1977.
- [55] Beck, R. F.. Motions in Waves. In *Principles of Naval Architecture, Second Revision*. pp. 41-59, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, 1988.
- [56] Falcão, A. F. O. *Conversão de Energia das Ondas por Corpos Oscilantes – Texto de Apoio à disciplina de Energias Renováveis (5º ano)*, 2004-05. IST, Lisboa, 2004.
- [57] Qualisys AB. *Qualisys Track Manager User Manual*. Qualisys AB, Gothenburg, 2006.
- [58] Beer, F. P., Johnston, Jr., E. R. *Mechanics for Engineers. Dynamics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., London, 1957.

Restante bibliografia consultada

- [1] Kreyszig, E. *Advanced Engineering Mathematics. 9th Ed*. John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 2006.
- [2] Tipler, P. A., Mosca, G. *Physics for Scientists and Engineers. 5th Ed*. W. H. Freeman & Company, New York, 2004.
- [3] Ferraz, G. I. *Manual do Navegante. Regras e preceitos da lide do mar. 4ª Ed*. Livraria Bertrand, Lisboa, 1950.
- [4] Pedlosky, J. *Waves in the Ocean and Atmosphere. Introduction to Wave Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 2003.

- [5] HR Wallingford. *Multi-Element Wavemaker and Instrumentation for Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Proposal P4690*. HR Wallingford, Wallingford, 2006.
- [6] HR Wallingford. *Wave Probe Monitor User Manual*. HR Wallingford, Wallingford, 2006.
- [7] Beresford, P. J., Spencer, J.M.A., Clarke, J. *HR WaveData – Data acquisition and analysis software program User Manual - Report IT 493 Release 3.0*. HR Wallingford, Wallingford, 2005.
- [8] Beresford, P. J. *HR WaveMaker Wave generation control program Software Manual- Report IT 453 (Issue 5)*. HR Wallingford, Wallingford, 2003.
- [9] Nakayama, Y., Boucher, R. F. *Introduction to Fluid Mechanics*. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.
- [10] Bloomer, J. L. *Practical Fluid Mechanics for Engineering Applications*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [11] Albertsen, N. D., Beard, R. M. *State-of-the-art assessment of high capacity sea floor*. Proc. of the IEC conference on Offshore Moorings, (Owen, D. G., Abdi, S. M., Elliot, G., Ridley, T. Ross, E. A., Standing, R. G. ed.), 10 March 1982, East Kilbridge, pp. 129-142, Thomas Telford, Ltd, London
- [12] Applied Technologies Company Ltd. *Float Wave Electric Power Station*. Applied Technologies Company Ltd, Moscow, 2006
- [13] Gomes, R.P. F. *Cálculo dos coeficientes da massa adicionada e de amortecimento - Preliminar*. IST, Lisboa, 2008.
- [14] Landweber, L. Motion of immersed and floating bodies. In *Handbook of fluid dynamics*, Ch. 13, McGraw-Hill, New York 1961.
- [15] Hogben, N. *Fluid Loading of offshore Structures, A State of Art Appraisal: Wave Loads*. Royal Institution of Naval Architects, London, 1974.
- [16] Timoshenko, S. P., Young, D. H. *Theory of Structures*. 2nd Ed. McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.
- [17] Agarwal, A. K., Jain, A. K. *Dynamic behaviour of offshore spar platforms under regular sea waves*. Ocean Engineering 30 (2003), pp. 487-516, Elsevier Ltd., Amsterdam.
- [18] Fitzgerald, J., Bergdahl, L. *Including moorings in the assessment of a generic offshore wave energy converter: Afrequency domain approach*. Marine Structures 21 (2008), pp. 23-46, Elsevier Ltd., Amsterdam
- [19] Saulnier, J.-B. Analysis of an OWC buoy (wave energy converter). Dissertação de Mestrado, UCC-HMRC/ECN. 2004
- [20] Hughes, S. A., coastal structure models. In *Physiscal Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, World Scientific, Singapore, 1993
- [21] Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., Silva, R., Neves, L., Santos, P. R., Lopes, H. G., Neves, A. *O novo sistema de geração e aquisição de agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP*. Conf. Sobre Jornadas de Hidráulica, Recursos, Hídricos e Ambiente, (Taveira-Pinto, F., ed.), 2007, Porto, Portugal, (in print), Porto.
- [22] Silva, R., Taveira-Pinto, F. *Specific Kinetic Wave Energy Definition*. Proceedings of the First International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab06), 2006, Madrid, pp. 13-23. (in print).

- [23] Nielsen, K., Meyer, N. I. *The Danish Wave Energy Program*. 1998.
http://www.oecos.com/CEM/cem8-1_nielsen.htm. 12-11-2007
- [24] Meyer, N. I., Nielsen, K. *The Danish Wave Energy Program Secon Year Status*. 2000.
<http://www.oreg.ca/docs/DenmarkYear2Status.pdf>. 12-11-2007.
- [25] De Rouck, I. J. *SEEWEC A promising WEC: multiple point absorbers in a floating platform*. 2006. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp_events/ocran_energy/1025_seewec_en.pdf. 15-10-2007.
- [26] Babarit, A., Clément, A. H., Gilloteaux, J. C. *The SEAREV Wave Energy Converter*. 2006.
<http://modefrontier.com/GetDoc?f=marine/free/pdf1.pdf>. 20 Dez 2007.
- [27] Babarit, A., Clément, A. H., Gilloteaux, J. C. *The SEAREV Wave Energy Converter*. 2006.
<http://modefrontier.com/GetDoc?f=marine/free/pdf1.pdf>. 20 Dez 2007.
- [28] Knapp, W., Mayr, B., Faust, M., Schilling, R. *Optimal Power Takeoff System Layout for the Seawave Slot-Cone Generator Kvitsøy Pilot Plant*. Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [29] Whittaker, T. Collier, D., Folley, M., Osterried, M., Henty, A., Crowlwy, M. *The development of Oyster – A shallow water surging wave energy converter*. Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [30] Weinstein, A., Nielsen, K., Zandiyeh, K., Bensted, J. *The AquaBuOY Hose-pump – theory and experimental results*. Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [31] Mann, L. D., Burns, A. R., Ottaviano, M. E. *CETO, a Carbon Free Wave Power Energy Provider of the Future*. Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [32] Chaplin, R., Aggidis, A. *WRASPA, Wave Interactions and Control in a new Pitching-Surge point-Absorber Wave Energy Converter*. Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [33] The Engineering Business Ltd. *EB Frond Wave Energy Converter – Phase 2*. Contract V/06/00204/00/REP, URN 05/865. Crown. 2005.
<http://www.engb.com/downloads/EB%20Frond%20Phase%20r.pdf>. 20 Dez 2007.
- [34] <http://www.abletechnologiesllc.com>. 14-9-2007
- [35] <http://www.avinc.com>. 16-9-2007
- [36] <http://www.atecom.ru>. 14-9-2007
- [37] <http://www.istc.ru/ISTC/sc.nsf/html/projects.htm?open&id=1363&lang=en>. 2-10-2007
- [38] <http://www.aquamarinepower.com>. 20-9-2007
- [39] <http://brandlmotor.de>. 14-9-2007
- [40] <http://www.ceto.com.au>. 10-9-2007
- [41] <http://www.daedalus.gr/DAEI/PRODUCTS/RET/indexRet1.htm>. 16-9-2007
- [42] <http://www.dexawaveenergy.co.uk/index.php?page=1>. 22-9-2007
- [43] <http://www.hi-spec-uk.com>. 22-9-2007
- [44] <http://www.greenoceanenergy.com>. 25-9-2007

- [45] <http://www.inri.us>. 10-9-2007
- [46] <http://www.anwsite.com>. 10-9-2007
- [47] <http://www.jamstec.go.jp/jamstec/MTD/Whale>. 31-8-2007
- [48] <http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/research/wave%20energy.asp>. 14-9-2007
- [49] <http://www.motorwavegroup.com/new>. 22-9-2007
- [50] <http://www.dalgaenerjisi.com/ana-english.asp>. 24-9-2007
- [51] <http://www.wipo.int/portal/index.html.en>. 24-9-2007
- [52] <http://neo-aerodynamic.com>. 31-8-2007
- [53] <http://www.oceanenergy.ie>. 28-9-2007
- [54] <http://oceannavitas.com>. 22-9-2007
- [55] <http://www.owec.com>. 31-8-2007
- [56] <http://www.oceanlinx.com>. 10-9-2007
- [57] <http://www.oceanmotion.ws>. 31-8-2007
- [58] <http://www.oceanpowertechnologies.com>. 31-8-2007
- [59] <http://www.orecon.com>. 10-9-2007
- [60] <http://www.reh-plc.com>. 10-9-2007
- [61] <http://www.renewableenergypumps.com>. 22-9-2007
- [62] <http://www.sara.com>. 10-9-2007
- [63] <http://www.seabased.com>. 10-9-2007
- [64] <http://www.seewec.org>. 14-9-2007
- [65] <http://www.sewave.fo>. 20-9-2007
- [66] <http://www.syncwaveenergy.com>. 6-9-2007
- [67] <http://www.gedwardcook.com/wavegenerator>. 20-9-2007
- [68] <http://www.tridentenergy.co.uk>. 14-9-2007
- [69] http://peswiki.com/index.php/Image:Balkee_Tide_and_Wave_Electricity_Generator_prototype_95x95.jpg. 22-9-2007
- [70] <http://www.wavebob.com>. 14-9-2007
- [71] <http://www.cna.nl.ca>. 29-9-2007
- [72] <http://www.aw-energy.com>. 31-8-2007
- [73] <http://waveberg.com>. 6-9-2007
- [74] <http://www.wavegen.co.uk/> 6-9-2007
- [75] http://www.windwavesandsun.com/WaveBlanket_INCEED2005.htm#_edn6. 28-10-2007
- [76] <http://www.carbontrust.co.uk>. 10-9-2007
- [77] http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/01-02/RE_info/wave%20power.htm. 10-9-2007

- [78] <http://www.wave-energy-centre.org>. 10-9-2007
- [79] <http://www.wave-energy.net>. 6-9-2007
- [80] <http://www.ultramarine.com/hdesk/runs/samples/mooring/doc.htm#what>. 1-2-2008
- [81] <http://eecs.oregonstate.edu/wesrf>. 10-9-2007
- [82] <http://www.iea-oceans.org>. 14-9-2007
- [83] <http://www.oceanwavemaster.com/pdf/owl-1.pdf>. 14-9-2007
- [84] Neumann, F., Brito Melo, A. Sarmiento, A. *Grid Connected OWC Wave Power Plant At Azores, Portugal*. 2006. http://www.wave-energy-centre.org/docs/projects%20overview/Pico%20OTTI%202006_FN_uk.pdf. 6-9-2007
- [85] Sarmiento, A. Brito-Melo, A. Neumann, F. *Results from sea trials in the OWC European wave energy plant at Pico, Azores*. 2006. http://www.wave-energy-centre.org/docs/projects%20overview/WREC%202006_AS_ABM_FN_uk.doc. 6-9-2007
- [87] Green Ocean Energy Ltd. *Green Ocean Energy Ltd. Issue 1*. 2006. <http://www.greenoceanenergy.com>. 25-9-2007
- [88] http://www.iea-oceans.org/_fich/6/IEA-OES_Wave_and_Tidal_report.pdf. 14-9-2007
- [89] PB Power. *Renewable Energy Holdings PLC Technical Appraisal of the "CETO" Wave Power Generation Devices*. 2006. <http://www.ceto.com.au/ceto-technology/pdf/pb-report-full.pdf>. 10-9-2007
- [90] EPRI. *Offshore Wave Energy Conversion Devices*. 2004. http://oceanenergy.epri.com/attachments/wave/reports/003_Oregon_Site_Report.pdf. 22-9-2007
- [91] Ambassador Newfoundland and Labrador Program. *The Ambassador, Bringing Newfoundland and Labrador to the World*. 2006. <http://www.intrd.gov.nl.ca/ambassador/pdf/Ambassador14-2.pdf>. 29-9-2007
- [92] IEA-OES. *The IEA Ocean Energy Systems Newsletter*. 2005. http://www.iea-oceans.org/_fich/5/news5.pdf. 14-9-2007
- [93] Payne, G. S., Taylor, J. R. M., Bruce, T., Parkin, P. *Assessment of boundary-element method for modelling a free-floating sloped wave energy device. Part 1: Experimental validation*. Ocean Engineering 35 (2008), pp. 333-341, Elsevier Ltd., Amsterdam

A1

ESPECIFICAÇÕES INDICATIVAS PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO

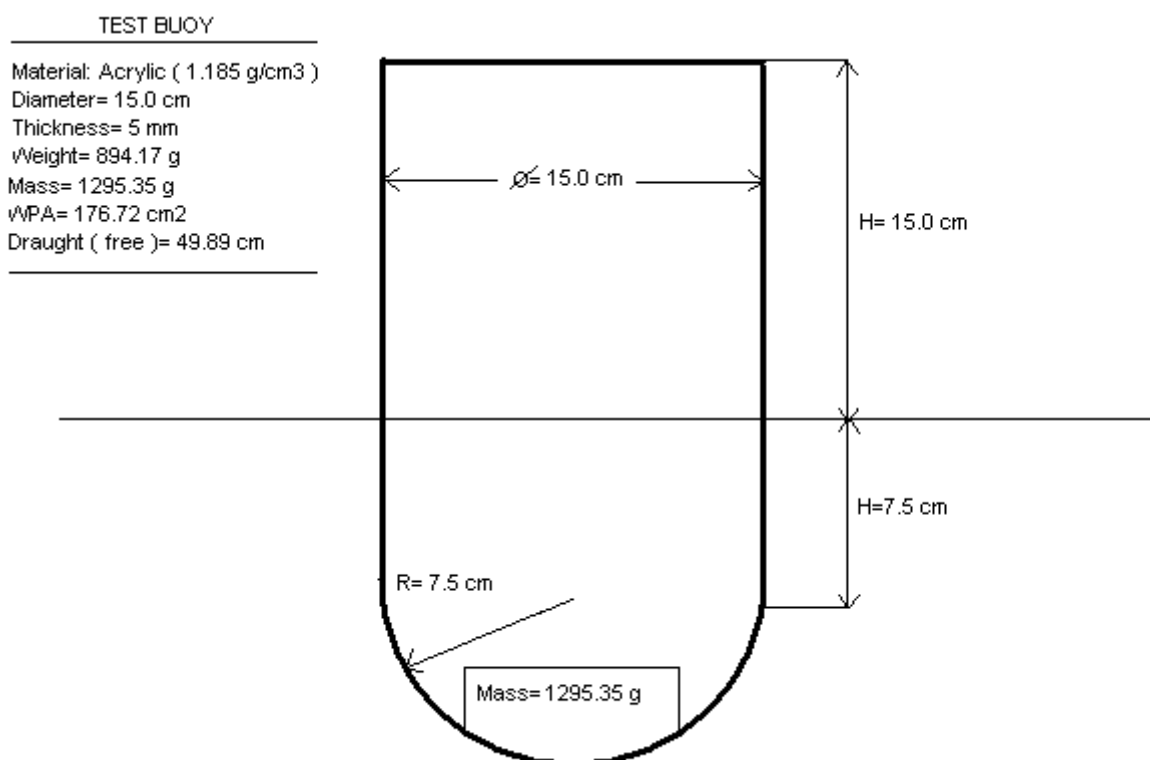


Fig.A1.1 – Esquema em corte do modelo previsto.

MOORING CONFIGURATION

PRE TENSION FORCE = 5 g

Draught at equilibrium= 15 cm

Buoy displacement= 2209 cm³

Cable weight per meter= 0.17 g/cm (3 x depth)

Chain ϕ = 0.92 mm

Cable laying on seabed= 92.694 cm

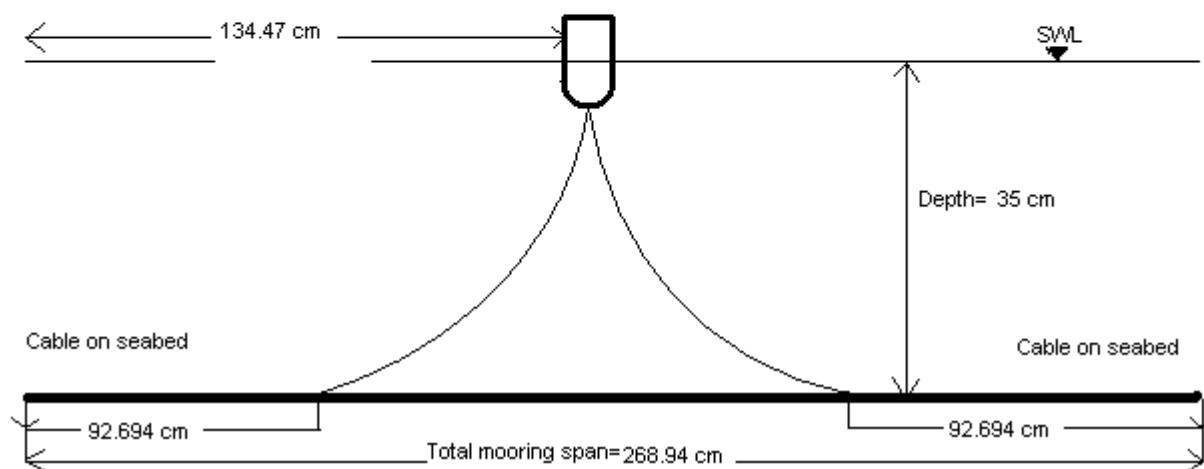


Fig.A1.2 – Esquema das condições de ensaio.

A2

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A2.1. ARFAGEM

Tabela A2.1 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da curva de factor de amplificação dinâmica em arfagem na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	FAD	Frequência (Hz)	FAD
1,229647159	4,320491	1,276065764	7,722046
1,23302116	4,507946	1,279317349	7,777912
1,23638461	4,710279	1,282558748	7,744479
1,239740946	4,928409	1,285793913	7,622174
1,243086883	5,162998	1,289020315	7,42028
1,246423838	5,414268	1,292239948	7,154707
1,249751218	5,681687	1,295450295	6,844419
1,253072415	5,963603	1,298651426	6,507969
1,256382187	6,256726	1,301846602	6,161283
1,259684582	6,555417	1,305033954	5,816584
1,262977027	6,851178	1,30821227	5,482416
1,266262879	7,132024	1,311384151	5,164129
1,269538263	7,382655	1,314547746	4,864707
1,272806524	7,585318		

Tabela A2.2 – Excerto dos resultados numéricos dos coeficientes de amortecimento em arfagem, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Coeficiente de amortecimento (kg/s)
1,229647159	1,010194276
1,23302116	1,007711159
1,23638461	1,005190704
1,239740946	1,002661853
1,243086883	1,000096169
1,246423838	0,99746875
1,249751218	0,994831503
1,253072415	0,992161139
1,256382187	0,989453608
1,259684582	0,986712226
1,262977027	0,983961597
1,266262879	0,981178072
1,269538263	0,978332096
1,272806524	0,975479601
1,276065764	0,972619437
1,279317349	0,969699243
1,282558748	0,966770853
1,285793913	0,963810572
1,289020315	0,960843652
1,292239948	0,957817626
1,295450295	0,954784916
1,298651426	0,951745891
1,301846602	0,948648581
1,305033954	0,945546304
1,30821227	0,942438483
1,311384151	0,939299762
1,314547746	0,936128904

Tabela A2.3 – Excerto dos resultados numéricos de massa adicionais em arfagem, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Massa adicional (kg)
1,229647159	0,457209
1,23302116	0,456778
1,23638461	0,456353
1,239740946	0,455932
1,243086883	0,455521
1,246423838	0,455117
1,249751218	0,454716
1,253072415	0,454325
1,256382187	0,453937
1,259684582	0,45356
1,262977027	0,453186
1,266262879	0,452821
1,269538263	0,452461
1,272806524	0,452106
1,276065764	0,451759
1,279317349	0,451418
1,282558748	0,451081
1,285793913	0,450753
1,289020315	0,450429
1,292239948	0,450115
1,295450295	0,449804
1,298651426	0,449497
1,301846602	0,449199
1,305033954	0,448909
1,30821227	0,448621
1,311384151	0,448341
1,314547746	0,448063

Tabela A2.4 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da fase em arfagem, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Fase (°)
1,229647159	-21,7647
1,23302116	-23,3883
1,23638461	-25,1848
1,239740946	-27,1778
1,243086883	-29,3941
1,246423838	-31,8638
1,249751218	-34,6199
1,253072415	-37,6977
1,256382187	-41,1336
1,259684582	-44,9612
1,262977027	-49,2083
1,266262879	-53,889
1,269538263	-58,9977
1,272806524	-64,4992
1,276065764	-70,3245
1,279317349	-76,3695
1,282558748	-82,5024
1,285793913	-88,5806
1,289020315	-94,4682
1,292239948	-100,053
1,295450295	-105,258
1,298651426	-110,04
1,301846602	-114,386
1,305033954	-118,308
1,30821227	-121,83
1,311384151	-124,984
1,314547746	-127,808

A2.2. CABECEIO

Tabela A2.5 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da curva do factor de amplificação dinâmica em cabeceio, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	FAD
0,657272608	0,778676
0,663564609	0,810855
0,669795025	0,844967
0,675969247	0,881204
0,682086364	0,919773
0,688150314	0,960917
0,694158899	1,00491
0,700117106	1,052063
0,706023856	1,102739
0,711883931	1,157346
0,717693845	1,216382
0,723462845	1,28041
0,729182786	1,350095
0,734852551	1,426235
0,74048676	1,509778
0,746073968	1,601861
0,751621854	1,703894
0,757126895	1,81757
0,762596555	1,945027
0,768022935	2,088936
0,773413393	2,252723
0,778765472	2,440825
0,78408102	2,659122
0,789363932	2,915506
0,7946044	3,22095
0,799813651	3,591026
0,804994353	4,04872

Tabela A2.6 – Excerto dos resultados numéricos dos coeficientes de amortecimento em cabeceio, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Coeficiente de amortecimento (kg.m ² /s)
0,657272608	0,000409571
0,663564609	0,000425012
0,669795025	0,000440632
0,675969247	0,000456747
0,682086364	0,000473362
0,688150314	0,000490163
0,694158899	0,000507472
0,700117106	0,000524969
0,706023856	0,00054298
0,711883931	0,000561183
0,717693845	0,000579907
0,723462845	0,000599165
0,729182786	0,000618615
0,734852551	0,000638597
0,74048676	0,000658782
0,746073968	0,000679506
0,751621854	0,000700782
0,757126895	0,000722257
0,762596555	0,000744293
0,768022935	0,000766887
0,773413393	0,00078969
0,778765472	0,00081306
0,78408102	0,000837005
0,789363932	0,000861164
0,7946044	0,000885897
0,799813651	0,00091122
0,804994353	0,000936764

Tabela A2.7 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da inércia adicional em cabeceio, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Inércia adicional (kg.m ²)
0,657272608	0,004541383
0,663564609	0,004545714
0,669795025	0,004549971
0,675969247	0,004554228
0,682086364	0,004558559
0,688150314	0,004562891
0,694158899	0,004567222
0,700117106	0,004571479
0,706023856	0,00457581
0,711883931	0,004580217
0,717693845	0,004584548
0,723462845	0,004588879
0,729182786	0,004593286
0,734852551	0,004597617
0,74048676	0,004602023
0,746073968	0,004606355
0,751621854	0,004610761
0,757126895	0,004615167
0,762596555	0,004619573
0,768022935	0,004623979
0,773413393	0,004628385
0,778765472	0,004632791
0,78408102	0,004637198
0,789363932	0,004641604
0,7946044	0,00464601
0,799813651	0,004650416
0,804994353	0,004654822

Tabela A2.8 – Excerto dos resultados numéricos dos valores da fase em cabeceio, na zona próxima da ressonância.

Frequência (Hz)	Fase (°)
0,657272608	89,96722
0,663564609	89,96451
0,669795025	89,96155
0,675969247	89,95833
0,682086364	89,95482
0,688150314	89,95098
0,694158899	89,9468
0,700117106	89,9422
0,706023856	89,93716
0,711883931	89,93162
0,717693845	89,92551
0,723462845	89,91875
0,729182786	89,91126
0,734852551	89,90293
0,74048676	89,89363
0,746073968	89,88321
0,751621854	89,87149
0,757126895	89,85823
0,762596555	89,84315
0,768022935	89,82589
0,773413393	89,80599
0,778765472	89,78287
0,78408102	89,75572
0,789363932	89,7235
0,7946044	89,68472
0,799813651	89,63731
0,804994353	89,57818